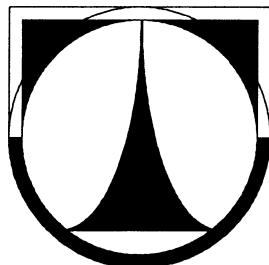


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**PROVOZNÍ PODMÍNKY MOTORU TĚŽKÉHO VOZIDLA PŘI
VYSOKÉ HUSTOTĚ PROVOZU**

**TRUCK ENGINE OPERATING CONDITIONS IN HEAVY
TRAFFIC**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

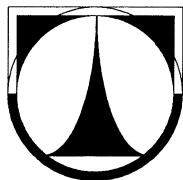
Michal Voráček

2012/2013

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302R022

Stroje a zařízení

Zaměření

Dopravní stroje a zařízení

**PROVOZNÍ PODMÍNKY MOTORU TĚŽKÉHO VOZIDLA PŘI
VYSOKÉ HUSTOTĚ PROVOZU**

**TRUCK ENGINE OPERATING CONDITIONS IN HEAVY
TRAFFIC**

Bakalářská práce

KVM – BP – S12000729

Michal Voráček

Vedoucí diplomové práce: Michal Vojtíšek, M.Sc., Ph.D. - TU v Liberci, KVM

Konzultant diplomové práce: Ing. Martin Pechout - TU v Liberci, KVM

Počet stran: 63

Počet obrázků: 31

Počet příloh: 0

Počet výkresů: 7

2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Michal V O R Á Č E K**

Studijní program: **B2341 Strojírenství**

Obor: **2302R022 Stroje a zařízení**

Zaměření: **Dopravní stroje a zařízení**

Ve smyslu ZÁKONA č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

PROVOZNÍ PODMÍNKY MOTORU TĚŽKÉHO VOZIDLA PŘI VYSOKÉ HUSTOTĚ PROVOZU

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Cílem práce je experimentálně vyšetřit a popsat provozní podmínky vznětového motoru těžkého silničního vozidla při jízdě v koloně během velmi vysoké hustoty a malé plynulosti provozu. Práce je zaměřena na sledování teploty výfukových plynů a účinnosti katalytických zařízení.

1. Zúčastněte se alespoň jednoho měření těžkých silničních vozidel za provozu.
2. Dle dodaného konceptu navrhnete odběrovou sondu, připevnitelnou na výfukové potrubí různých nákladních vozidel, která obsahuje a) sondu odebírající výfukové plyny z vnitřku výfukového potrubí, b) termočlánek pro měření teploty výfukových plynů v místě odběru, c) vývod neředěného vzorku pro analyzátor plyných emisí, d) vývod ředěného vzorku pro vzorkovač částic, a e) přívod vzduchu pro ředění vzorku.
3. Navrženou sondu sestrojte (specializované práce možné zadat).
4. Ověřte funkčnost sestrojené sondy při minimálně jednom měření těžkého vozidla.
5. Při tomto měření proveďte a následně vyhodnoťte měření teploty výfukových plynů během jízdy v kongesci a během "běžné" jízdy v městském a mimoměstském provozu.



Provozní podmínky motoru těžkého vozidla při vysoké hustotě provozu

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá provozními podmínkami a výfukovými emisemi motoru těžkého vozidla. V práci je popsán vliv odporů prostředí a klimatických podmínek na provoz motoru, dále vznik emisí, jejich složení, měření a systémy na jejich redukci.

Cílem práce bylo a) navrhnout a sestavit odběrovou sondu výfukových plynů, jejíž úkolem bylo odebírání vzorků výfukových plynů, ředění části toku plynů se vzduchem a zředěnou směs dopravit do vzorkovacího zařízení, za b) provést měření teplot výfukových plynů při jízdě těžkého vozidla v reálném provozu.

Odběrová sonda byla zkonstruována a úspěšně otestována během čtyřdenního měření v provozu hlavního města Prahy. Odebírání vzorků probíhalo na nákladním vozidle Iveco Trakker. Sonda byla vybavena termočlánekem na měření teplot výfukových plynů. Během testování bylo navzorkováno 23 provozních hodin a výsledkem byl průběh teplot výfukových plynů závislý na provozních podmínkách motoru při různé hustotě provozu. Při detailním prozkoumání výsledků se ukázalo, že teplota výfukových plynů při jízdě v hustém provozu dosahuje hodnoty okolo 150 °C, co může mít za následek omezení účinnosti katalytických zařízení.

Klíčová slova: spalovací motor, emise výfukových plynů, měření emisí, snížení emisí, provozní podmínky motoru, teploty výfukových plynů

Truck engine operating conditions in heavy traffic

Annotation

This bachelor thesis deals with truck engine operating conditions and exhaust emissions. In thesis is subscribed influence of environment resistances and climate conditions to engine operating conditions, further emissions forming, their composition, measuring and reducing emissions devices.

Goals of this thesis are a) design and construct sampling probe for taking exhaust gas samples, dilution of partial flow exhaust gas with air and transport diluted mixture to sampling device, b) to realize exhaust gas temperature measuring during real traffic on heavy truck.

Sampling probe was designed and constructed and it's performance verified during four days of tests on a heavy truck in Prague traffic. Sampling was realized on heavy truck Iveco Trakker. The Probe was equipped by thermocouple for measuring of exhaust gas temperature. It was sampled 23 hours of testing and the result was process between temperature and heavy truck operating conditions. The measuring was running on different traffic conditions. Closer look to results shown, that exhaust gas temperature was dropping to around 150 °C during traffic jam, which could result in catalytic devices malfunction.

Key words: combustion engine, exhaust gas pollutants, measuring pollutants, reducing pollutants, operating engine conditions, exhaust gas temperature

Desetinné třídění:	621.43.01 - Teorie spalovacích motorů
Zpracovatel:	TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů
Dokončeno :	2013
Archivní označení zprávy:	

Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Michalu Vojtíškovi, M.Sc. Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Martinu Pechoutovi za odborné rady k řešené problematice i k samotnému textu této práce a za obětavou pomoc při zpracování.

Seznam symbolů a jednotek

CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
H ₂ O	voda
H ₂	vodík
N ₂	dusík
O ₂	kyslík
O ₃	ozon
NO _x	oxidy dusíku
NO	oxid dusnatý
N ₂ O	oxid dusný
NO ₂	oxid dusičitý
HC	nespálené uhlovodíky
PM	pevné částice
CuO	oxid měďnatý
NiO	oxid nikelnatý
NH ₃	amoniak
Pt	platina
Pd	palladium
Rh	rhodium
Euro	označení emisních norem
CVS	metoda konstantního průtoku ředěných výfukových plynů
NDIR	nedisperzní infraanalyzátor
FID	plamenoionizační detektor
CLA	chemiluminiscenční analyzátor
EGR	recirkulace výfukových plynů
SCR	selektivní katalytická redukce
AdBlue	název aditiva
DPF	filtr pevných částic
MEDETOX	název projektu
N3	vozidla, jejichž přípustná hmotnost převyšuje 12 000 kg
EHK	evropská hospodářská komise
OSN	organizace spojených národů

DIN	německá národní norma	
GPS	globální družicový polohový systém	
λ	součinitel přebytku vzduchu	[-]
t	teplota výfukových plynů	[°C]
U	napětí	[mV]
R	odpor	[Ω]
t_{\max}	maximální teplota rozsahu převodníku	[°C]
t_{\min}	minimální teplota rozsahu převodníku	[°C]
I_{\max}	horní proudová hranice převodníku	[mA]
I_{\min}	dolní proudová hranice převodníku	[mA]
O_c	odpor celkový	[N]
O_v	odpor vzduchu	[N]
O_f	odpor valení	[N]
O_s	odpor ze stoupání	[N]
O_z	odpor ze zrychlení	[N]
O_p	odpor přívěsu	[N]
F_h	hnací síla na kolech vozidla	[N]
ρ	měrná hmotnost vzduchu	[kg.m ⁻³]
S_x	čelní plocha vozidla	[m ²]
c_x	součinitel odporu vzduchu	[-]
v	rychlost vozidla	[m/s]
G_v	tíha vozidla	[N]
α	sklon vozovky	[°]
f	součinitel odporu valení	[-]
δ	součinitel vlivu rotujících částí	[-]
m_v	hmotnost vozidla	[kg]
a	zrychlení vozidla	[ms ⁻²]
O_{vPV}	odpor vzduchu připojeného vozidla	[N]
O_{fPV}	odpor valení připojeného vozidla	[N]
O_{sPV}	odpor ze stoupání připojeného vozidla	[N]
O_{aPV}	odpor ze zrychlení připojeného vozidla	[N]
K	parametr indikovaného výkonu	[-]
P_i	indikovaný výkon vozidla	[kW]
$P_{i,ref}$	referenční indikovaný výkon vozidla	[kW]

p_a	atmosférický tlak	[kPa]
φ	relativní vlhkost vzduchu	[-]
T_a	teplota nasávaného vzduchu	[K]
$T_{W,CH,L}$	teplota chladicího media na vstupu do chladiče	[K]
p_p	tlak nasycených vodních par	[kPa]
η_m	výchozí mechanická účinnost	[%]

Obsah

1	ÚVOD	13
1.1	Historie spalovacích motorů	13
1.2	Zážehový motor	14
1.3	Vznětový motor	15
1.4	Paliva	15
1.5	Jízdní odpory vozidla	15
1.6	Vliv okolí na provozní podmínky motoru	19
2	SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ	21
2.1	Jednotlivé složky výfukových plynů	22
2.2	Vliv spalovacích motorů na životní prostředí	23
2.3	Působení výfukových spalin na životní prostředí	23
2.4	Vznik chemických škodlivin pístového spalovacího motoru	24
3	MĚŘENÍ EMISÍ	26
3.1	Emisní norma Euro	27
3.2	Měření emisí vznětových motorů	28
4	ZAŘÍZENÍ NA REDUKCI ŠKODLIVIN	30
4.1	Katalyzátory	32
4.2	Recirkulace výfukových plynů	35
4.2.1	Nízkotlaká a vysokotlaká recirkulace	36
4.3	Systém SCR	37
4.4	Filtr pevných částic	39
4.5	Lambda sonda	40
5	MĚŘENÍ TEPLoty VÝFUKOVÝCH PLYNŮ TEŽKÉHO VOZIDLA V REÁLNÉM PROVOZU	41
5.1	Úvod k měření	41
5.1.1	Úvod k ředění výfukových plynů	42
5.1.2	Rizika specifická pro městský provoz	43
5.2	Ředicí tunel	43
5.3	Měřicí podmínky	46
5.3.1	Měření nákladní automobil	46
5.3.2	Odběrné a měřicí zařízení	47
5.3.3	Měřicí trasy	49

5.3.4	Styl jízdy.....	50
5.4	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	51
5.5	Zhodnocení měření.....	58
6	Diskuze výsledků	59
7	Závěr bakalářské práce	60
	Zdroje a použitá literatura.....	61

1 Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o provozních podmínkách spalovacích motorů, jejich vlivu na životní prostředí a o způsobu jejich měření. Součástí je ověření teoretických poznatků v reálném provozu a návrh součástí, nutné pro realizaci měření. Dále seznamuje s problematikou škodlivých výfukových plynů a jejich možné snížení.

Snižování spotřeby paliva, které je v současné době celosvětovým trendem kvůli omezenému množství zásob ropy, jde ruku v ruce se snižováním škodlivých emisí spalovacích motorů. S neustále se zvyšujícím počtem motorových vozidel, je problematika ochrany životního prostředí jedna z prioritních. Již nyní jsou výrobci motorových vozidel nuceni splňovat velmi přísné emisní limity, které mají zásadní vliv na konstrukci dnešních motorů, a v blízké budoucnosti se očekávají ještě další zpřísnění a omezení.

Z tohoto důvodu přichází na trh hybridní vozidla (vozidla s kombinací spalovacího motoru a elektromotoru) a elektromobily, jejichž produkce škodlivin je výrazně nižší a v případě elektromobilů téměř nulová. Ovšem téměř nulové škodliviny elektromobilů nejsou tak ekologické, jak se může na první pohled zdát. Elektrárny, dodávající elektřinu nutnou k jejich provozu, spalující fosilní paliva značně zamořují životní prostředí. To samé platí při výrobě objemných baterií, které vozidla se spalovacím motorem nepotřebují.

Samozřejmě, že znečištěné ovzduší není vinou pouze motorových vozidel, ale tato bakalářská práce se zabývá pouze spalovacími motory a jejich vlivu na životní prostředí.

1.1 Historie spalovacích motorů

Spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který vnitřním nebo vnějším spalováním paliva pomocí pístu přeměňuje chemickou energii na energii mechanickou a tepelnou. Pístové spalovací motory jsou pohonnou jednotkou pro většinu dopravních prostředků od malých motocyklů, přes automobily, nákladní vozidla po lodě, lehká letadla, atd.

Za počátek éry spalovacích motorů se dá považovat 2. polovina 19. století, kdy v letech 1859 – 1860 Belgičan Jean Étienne Lenoir navrhl a zkonstruoval spalovací motor poháněný svítiplynem. Ovšem úspěšnější byl německý inženýr Nikolaus August Otto, když

roku 1876 zkonstruoval a nechal si patentovat čtyřtákní motor, poháněný svítiplynem, který se stal základem pro stavbu pozdějších spalovacích motorů. Motor dostal název čtyřdobý, protože jeden pracovní oběh se skládá ze čtyř zdvihů pístu a to: sání, komprese, expanze a výfuk. Přesto, že motor má čtyři zdvihy, jen expanzní koná práci a dochází k nerovnoměrnému chodu motoru. K rovnoměrnosti chodu bylo nutné přidat těžký setrvačnick. Později byly motory zdokonaleny a rovnoměrnost chodu zajišťovalo víc válců za sebou, nejčastěji čtyři nebo šest. Pracovní cykly válců na sebe navazují, čímž se dosáhne rovnoměrnějšímu chodu.

První motory na kapalná paliva byly zkonstruovány dvěma německými inženýry Gottlieba Daimlera a Wilhelma Maybacha. Když v roce 1885 namontovali tento motor do dřevěného kola, vznikl první motocykl. V roce 1885 motor zabudovali do čtyřkolového zařízení a vznikl automobil poháněný spalovacím motorem. Tímto začala éra nového dopravního prostředku.

V případě dvoutákních motorů, první z nich byl sestaven 1878 v Británii Skotem Dugaldem Clerkem. Na vývoji dvoutákního motoru se podílel také automobilový konstruktér Karl Benz. V roce 1884 ve své továrně v Meinheimu zkonstruoval dvoutákní plynový motor. Následně podle Ottova patentu navrhl čtyřdobý motor, který upravil na benzinové palivo a namontoval do tříkolového podvozku. Automobil byl vybaven elektrickým zapalováním, diferenciálem a vodním chlazením.

1.2 Zážehový motor

Zážehový motor je motor, u kterého se směs paliva a vzduchu zapaluje pomocí elektrické jiskry ze zapalovací svíčky. Zážehové motory pracují s nižším kompresním tlakem a nejvyššího výkonu je dosaženo ve vyšších otáčkách. Palivem je benzin, u kterého je důležitá jeho odolnost proti samovznícení. Odolnost proti samovznícení udává oktanové číslo paliva.

Zážehové motory se rozdělují na čtyřdobé (pracovní cyklus proběhne za dvě otáčky klikového hřídele) a dvoudobé (pracovní cyklus proběhne za jednu otáčku klikového hřídele). Oproti vznětovému motoru má menší účinnost.

1.3 Vznětový motor

Palivo je do válce vznětového motoru dopravováno odděleně od vzduchu vysokotlakým čerpadlem. Nejprve je do válce nasán vzduch, který se po uzavření sacího ventilu stlačuje. Těsně před horní úvratí je vstříknuto palivo. Vstříknuté palivo se ve válci vlivem teploty stlačeného vzduchu samovznítí a začne hořet. Tlak ve spalovacím prostoru stoupne na 5 - 8 Mpa, teplota dosáhne 1800 – 2000 °C. Ve fázi expanze je pak vzniklý tlak převeden na mechanickou práci, adiabatický děj. V poslední fázi se otevírá výfukový ventil a spaliny jsou vytlačeny do výfuku, izobarický děj. Citováno z [7].

Palivem je motorová nafta, jejíž kvalitu udává cetanové číslo. Vznětový motor pracuje obvykle jako motor čtyřdobý.

1.4 Paliva

K pohonu spalovacích motorů se využívají ropné deriváty. Pro naprostou většinu zážehových motorů se používá benzin a v malé míře propan-butan, zemní plyn a etanol. Za zmínku stojí ještě využití alternativních paliv jako je vodík, butanol a bioplyn.

Pro vznětové motory se nejčastěji používá motorová nafta, dále bionafta, která je směsí n-alkylesterů a mastných kyselin. Používají se ale i nízkonákladové náhražky nafty jako je fritovací olej.

Z experimentálních paliv stojí za zmínku 95 % etanol, alkoholy, dimethyléter a další étery.

1.5 Jízdní odpory vozidla

Jízdní odpory jsou síly působící proti pohybu směru pohybu vozidla a mají zásadní vliv na provozní podmínky vozidla. Celkový jízdní odpor viz. obr. 1.5.1 je dán součtem jednotlivých dílčích odporů a tento celkový odpor musí být překonán hnací silou od

motoru. Patří sem odpor vzduchu O_v , valivý odpor O_f , odpor ze stoupání O_s , odpor ze zrychlení O_z a v případě, že je k vozidlu připojen přívěs, tak také odpor přívěsu O_p .

Pro celkový odpor, neboli hnací sílu platí vztah (1):

$$O_c = O_v + O_f + O_s + O_z + O_p = F_h \quad (1)$$

kde: O_v Odpor vzduchu

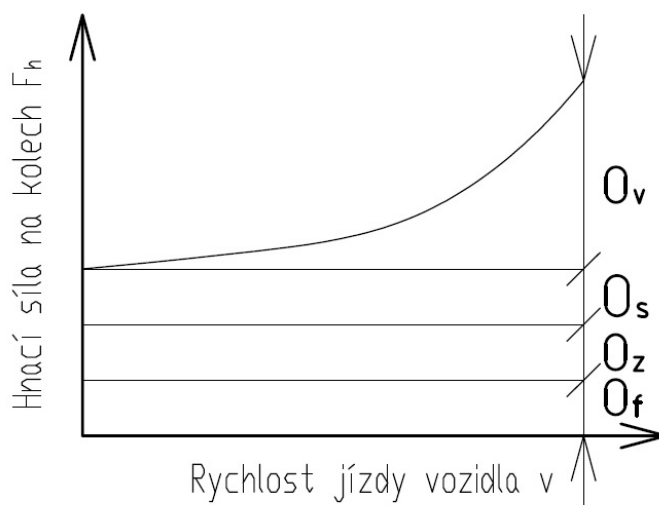
O_f Odpor valení

O_s Odpor ze stoupání

O_z Odpor ze zrychlení

O_p Odpor přívěsu

F_h Hnací síla na kolech vozidla



Obr. 1.5.1: Hnací síla potřebná k překonání jízdních odporů

- **Odpor vzduchu**

Odpor vzduchu je způsoben třením, které vzniká při kontaktu vozidla s prostředím, které vozidlo obklopuje. Je to síla směřující proti relativnímu pohybu vozidla.

Odpor vzduchu se vypočítá ze vztahu (2):

$$O_v = 1/2 \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \quad (2)$$

kde: ρměrná hmotnost vzduchu

S_xčelní plocha vozidla

c_xsoučinitel odporu vzduchu

vrychlost vozidla

- **Odpor valení**

Odpor valení vzniká deformací pneumatik při styku kol s vozovkou nebo případným povrchem terénu. Pneumatiky přenáší všechny síly vozidla působící na vozovku a naopak.

Valivý odpor se vypočítá ze vztahu (3):

$$O_f = G_v \cdot \cos(\alpha) \cdot f \quad (3)$$

kde: G_v tíha vozidla

α sklon vozovky

f součinitel odporu valení

Hodnota součinitele odporu valení je ovlivněna několika faktory, a to povrchu vozovky, nahuštění pneumatik a rychlostí vozidla.

- **Odpor ze stoupání**

Odpor ze stoupání vzniká při jízdě vozidla po nakloněné rovině. V praxi se výškový rozdíl vozovky charakterizuje převýšením vozovky vztažené na délku jejího průmětu do vodorovné roviny.

Odpor ze stoupání se vypočítá ze vztahu (4):

$$O_s = G_v \cdot \sin(\alpha) \quad (4)$$

- **Odpor ze zrychlení**

Při změně rychlosti působí na vozidlo setrvačné síly, které představují odpor ze zrychlení.

Odpor ze zrychlení se vypočítá ze vztahu (5):

$$O_z = \delta \cdot m_v \cdot a \quad (5)$$

kde: δsoučinitel vlivu rotujících částí

m_v hmotnost vozidla

azrychlení vozidla

- **Odpor přívěsu**

Odpor přívěsu je síla, kterou na vozidlo působí přípojně vozidlo. Tato síla je dána součtem odporů působících jako u samotného vozidla.

Odpor přívěsu se vypočítá ze vztahu (6):

$$O_p = O_{vPV} + O_{fPV} + O_{sPV} + O_{aPV} \quad (6)$$

kde: O_{vPV}odpor vzduchu připojeného vozidla

O_{fPV}odpor valení připojeného vozidla

O_{sPV}odpor ze stoupání připojeného vozidla

O_{aPV}odpor ze zrychlení připojeného vozidla

1.6 Vliv okolí na provozní podmínky motoru

Vliv okolí na provozní podmínky motoru je závislý zejména na změně teploty atmosférického vzduchu, vlhkosti a tlaku.

U nepřepřihovaných zážehových motorů změnou hustoty vzduchu dochází k odlišnému naplnění válce a ke změně točivého momentu. S rostoucí teplotou roste plnicí účinnost, ale také klesá indikovaný tlak a tím i mechanická účinnost.

U nepřepřihovaných vznětových motorů s rostoucí teplotou klesá součinitel přebytku vzduchu, což má negativní vliv na točivý moment a zvyšuje se teplotní namáhání součástí motoru.

Co se týče motorů přepřihovaných, změna hustoty vzduchu působí nepříznivě na velikost plnicího tlaku.

Nárůst vlhkosti vzduchu o 10 % se projeví poklesem výkonu cca o 0,25 % a naopak. Velké množství par nasávaného vzduchu má nepříznivý vliv na naplnění válce spalitelnou směsí. Výrazný vliv na vlhkost vzduchu mají zážehové motory pracující v extrémních podmínkách, jako jsou motory letadlové.

Poměr indikovaného výkonu při reálných a standardních podmínkách definuje parametr K ze vztahu (7):

$$K = \frac{P_i}{P_{i,ref}} = \left(\frac{p_a - a \cdot \varphi \cdot p_p}{p_{a,ref} - \varphi_{ref} \cdot p_{p,ref}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{a,ref}}{T_a} \right)^n \cdot \left(\frac{T_{W,CH,L,ref}}{T_{W,CH,L}} \right)^q \quad (7)$$

Druh motoru	Konstanty				Změna atmosférických podmínek		
	a	m	n	q	p _a ±1,0 kPa	T _a ±5,0 °C	T _{W,CH,L} ±5,0 °C
Benzínový	1	1	0,5	0	±1,3	±1,1	-
Naftový o výkonu omezeném součinitelem přebytku vzduchu	1	1	0,7 5	0	±1,2	±1,5	-
Naftový o výkonu omezeném tepelným namáháním	0	1	1	0	±1,2	±2,0	-
Naftový přeplňovaný bez mezichladiče vzduchu	0	0,7	2	0	±1,95	±4,0	-
Naftový přeplňovaný s mezichladičem vzduchu	0	0,7	1,2	1	±1,9	±2,4	±1,3

Přibližná
změna
výkonu
[%]

Tab .1.6.1: Přepočtové konstanty a vliv atm. Podmínek na výkon motoru (ISO 3046/II). [25]

Výpočet efektivního výkonu s uvážením změn atmosférických podmínek ze vztahu (8):

$$P_e = P_{e,ref} \cdot [K - 0,7(1 - K) \cdot (1/\eta_{m,ref} - 1)] \quad (8)$$

kde p_a atmosférický tlak; $p_{a,ref} = 100$ kPa
 φ relativní vlhkost vzduchu; $\varphi_{ref} = 0,6$
 T_a teplota nasávaného vzduchu; $T_{a,ref} = 300$ K
 $T_{W,CH,L}$ teplota chladícího média na vstupu do chladiče plnicího vzduchu;
 $T_{W,CH,L,ref} = 300$ K
 p_p tlak nasycených vodních par při teplotě T_a ; $p_{p,ref} = 3,564$ kPa pro
 $T_{a,ref} = 300$ K
 $\eta_{m,ref}$ výchozí mechanická účinnost.

2 Složení výfukových plynů

Spalováním uhlovodíkového paliva, které obsahuje uhlík a vodík vzniká při dokonalé oxidaci oxid uhličitý (CO_2) a voda (H_2O). Naopak nedokonalou oxidací (jejíž příčiny jsou lokální či celkový nedostatek kyslíku, nedostatečná doba pro proběhnutí oxidace nebo důsledkem disipace spalin) uhlíku a vodíku, obsahují spaliny oxid uhelnatý (CO) a vodík (H_2). Ve srovnání se zážehovým motorem, vznětové motory pracují s vyšším přebytkem vzduchu, takže množství oxidu uhelnatého je o řád nižší. Při mísení paliva se vzduchem, je vždy nejvýznamnější složkou výfukových plynů dusík (N_2). Výfukové plyny obsahují kyslík (O_2), pokud všechen nebyl použit k oxidaci paliva (přebytek kyslíku v celé směsi nebo jen pouze lokálně vlivem špatného promísení). Oxidy dusíku (NO_x) vznikají oxidací vzdušného kyslíku za vysoké teploty při spalování. Za oxidy dusíku (NO_x) se zejména považují oxid dusnatý (NO) a v malém množství oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusný (N_2O) tzv. rajský plyn.

Výfukové plyny dále obsahují nespálené uhlovodíky (HC), které vznikají za velmi nepříznivých podmínek pro oxidaci, jako jsou nízký přebytek vzduchu λ , nízké teploty ve špatně dostupných místech spalovacího prostoru a blízkosti stěn, překročení meze zápalnosti nebo případné vynechání jiskry a u motorů s vnější tvorbou směsi ztrátovým vyplachováním. Nespálené uhlovodíky mohou mít odlišné složení podle obsahu jednotlivých uhlovodíků v palivu.

Při vysoké teplotě nastává uvnitř kapky paliva, kde se nevyskytuje žádné množství vzduchu, tzv. dekompozice molekul uhlovodíků, co má za následek vznik pevného uhlíku, neboli sazí.

Ochlazováním výfukových plynů ve výfukovém potrubí dochází k jejich kondenzaci a tím růstu částic. Následným ředěním je jejich růst potlačen. Velikosti částic se pohybují v jednotkách až stovkách nanometrů [26].

Ve výfukových plynech jsou ve větším množství zastoupeny aldehydy, které sice nepatří k přímo jedovatým látkám, ale nepříjemně zapáchají. Dále výfukové plyny obsahují v malém množství další pevné částice, jako jsou zbytky mazacího oleje, prach, části vnitřního opotřebení motoru, rzi atd.

Dříve se ve spalinách vyskytovaly také oxidy síry, díky síře obsažené v některých palivech, a sloučeniny olova z antidetonační přísady.

U vznětových motorů se z uvedených škodlivin sledují CO , NO_x , HC a pevné

částice, které zahrnují i saze.

Přístroje měřící plynné emise určují koncentrace CO, NO_x, HC a pevných částic, případně se určuje kouřivost motoru, kterou mají za následek saze.

2.1 Jednotlivé složky výfukových plynů

CO - (oxid uhelnatý) bezbarvý plyn bez zápachu, jeho hustota je menší než hustota vzduchu, ve vodě je málo rozpustný. CO se zařazuje mezi nervové plyny kvůli vazbě oxidu uhelnatého na hemoglobin, který blokuje přenos kyslíku krví. I kdyby byl hemoglobinu dostatek, tak jednotlivé orgány nemají dostatečnou zásobu kyslíku.

CO₂ - (oxid uhličitý) bezbarvý plyn bez zápachu, jeho hustota je větší než hustota vzduchu. Není legislativně omezen, protože není přímou škodlivinou, ale podílí se na tvorbě skleníkového efektu a je považován za hlavní příčinu globálního oteplování Země.

HC - (nespálené uhlovodíky) jsou produktem nedokonalého spalování, mají velmi rozdílnou jedovatost. Jsou to prvky, které do procesu spalování vstoupily jako palivo, ale nedošlo k jejich spálení. Velké problémy působí uhlovodíky. Některé alkany a alkeny nejsou nebezpečné, polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) jsou karcinogenní a aldehydy jsou jedovaté, zapáchají a dráždí sliznice. Za spolupůsobení ultrafialového záření a oxidů dusíku podporují tvorbu ozónu O₃. Ke vzniku uhlovodíků dochází u předčasně zastavených reakcí nebo vynecháním spalování. Velkou roli hraje obsah kyslíku a teplota při spalování.

NO_x - oxidy dusíku, mezi které patří:

NO (oxid dusnatý) silně dráždí dýchací cesty, velmi rychle se váže na hemoglobin, ale také se velmi rychle odbourává, jedná se především o produkt zážehových motorů. V přítomnosti ozónu O₃ oxiduje na NO₂.

NO₂ (oxid dusičitý) je mnohem více toxický, oranžové barvy, štiplavě páchnoucí, napadá oči, plíce a sliznici. V plicích vytváří s vodou kyselinu HNO₂ HNO₃ a narušuje funkci plic. Váže se na hemoglobin, je také silné oxidační činidlo, poškozuje nadzemní části rostlin.

N₂O (oxid dusný, rajský plyn) se vyskytuje v malé míře, patří mezi skleníkové plyny, dlouhodobé a intenzivní vdechování může vést až k zástavě srdce.

Oxidy dusíku jsou výchozí látkou pro oxidační reakce.

PM - (pevné částice) mají rozměr řádu setin mikrometru, největší podíl jsou saze a organické látky ze spáleného paliva a oleje, obsahují i částice vzniklé mechanickým opotřebením motoru.

2.2 Vliv spalovacích motorů na životní prostředí

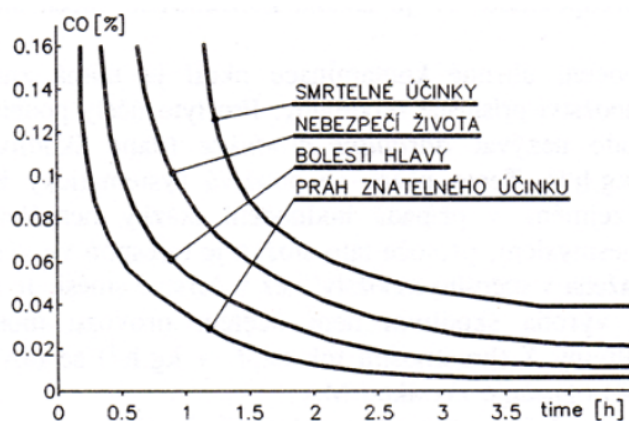
Škodliviny pístových spalovacích motorů se rozdělují podle způsobu působení na:

- **chemické** - škodlivé jedovaté (toxické) látky a látky mutagenní. Toxické látky přímo působí a poškozují živé organismy. Látky mutagenní vyvolávají změnu genetického kódu, převážně karcinogeny, které vyvolávají zhoubné bujení. Mutagenní látky se ve výfukových plynech vyskytují jako plynné a zčásti i pevné složky. Pevné složky jako např. saze, azbest působí na živé tkáně mechanickým podrážděním a navíc obsahují kondenzované kapalně škodliviny [5].
- **škodlivé mechanickou energií** - škodí vibracemi a hlukem motoru [5].
- **škodlivé tepelnou energií** - jedná se o globální škodliviny, které souvisí s výslednou účinností motoru a druhem použitého paliva [5].

2.3 Působení výfukových spalin na životní prostředí

Především plynné složky spalin mají toxické a mutagenní vlastnosti, toxické působí jedovatě přímo na živý organismus a mutagenní vyvolávají změny genetického kódu

Přímé působení na člověka závisí na koncentraci a době účinku viz. obr. 2.3.1.



Obr. 2.3.1: Vliv množství oxidu uhelnatého na člověka [5]

Složení škodlivin se mění během výfuku a průtoku výfukovým potrubím, kde pokračují oxidace, kondenzují páry a tvoří se stabilnější sloučeniny. Stabilnějšímu složení dochází po ochlazení výfukového plynu a promíchání s atmosférickým vzduchem. To však neznamená ukončení všech chemických procesů (např. probíhá tvorba ozónu)

Dosud nebyly jednoznačně prokázány některé účinky, jako jsou podíl vzniku alergií, snížení odolnosti proti infekcím dýchacích cest atd., ale jsou velmi pravděpodobné.

Emitované nanočástice obsahují množství látek, u kterých byl prokázán rakovinotvorný účinek a po vdechnutí se zachycují v plicních sklípcích a pronikají skrz buněčnou membránu do krevního oběhu. Tím přispívají ke snižování imunity, vzniku chronických onemocnění a celkově škodí lidskému zdraví.

2.4 Vznik chemických škodlivin pístového spalovacího motoru

- **Způsoby vzniku oxidu uhelnatého (CO)**

Koncentraci CO převážně určuje součinitel přebytku vzduchu λ . Chudá směs vede k růstu koncentrace CO a příliš bohatá směs (zážehové motory) také.

- Ke vzniku oxidu uhelnatého dochází neúplnou oxidací na oxid uhličitý CO_2 při nedostatku O_2
- disociací produktů dokonalého spalování při teplotách nad 2000°C
- při rychlé expanzi, kdy dochází k ochlazení spalin a zamrznutí oxidační reakce.

- **Vznik nespálených uhlovodíků (HC)**

- Vlivem předčasného zastavení oxidačních reakcí na konci hoření
- ve štěrbinách pístních kroužků, kde hasne planem vlivem chlazených stěn
- únik nespálené směsi do výfukového potrubí
- z mazacího oleje, který proniká do spalovacího prostoru, kvůli netěsnosti pístních kroužků, ventilů, odvětrání klikové skříňe. Projevuje se tzv. modrým kouřem
- vlivem nízké teploty plamene u příliš chudých směsí.

- **Vznik oxidů dusíku (NO_x)**

Pro jejich tvorbu je potřeba vysokých teplot nad 1400 °C. Dostatečný čas pro vznik NO_x dává kinetické hoření po průtahu vznětu. Každý vliv mající za následek prodloužení průtahu vznětu, zvyšuje tvorbu NO_x.

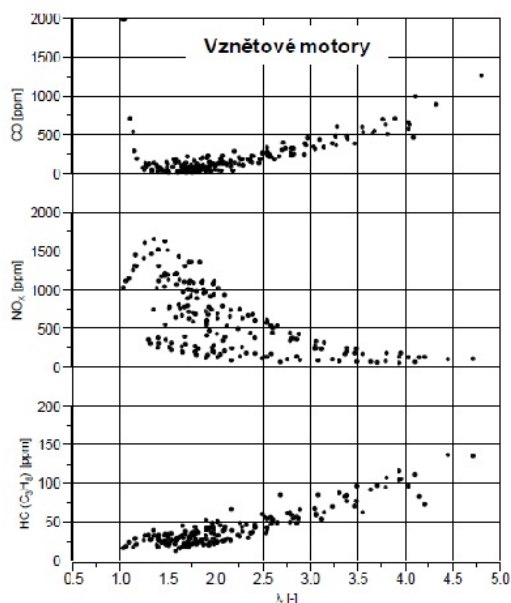
- NO vzniká pomalou řetězovou reakcí termického procesu tzv. Zeldovičova mechanismu
- NO₂ se tvoří oxidací NO, většinou až v atmosféře
- vlivem spalování chudé směsi u vznětových motorů, tvoří NO₂ až 60% objemu spalin
- při vysokých otáčkách oxidací vzdušného dusíku kyslíkem
- při rychlé expanzi, kdy dochází k ochlazení spalin.

- **Vznik pevných částic (PM)**

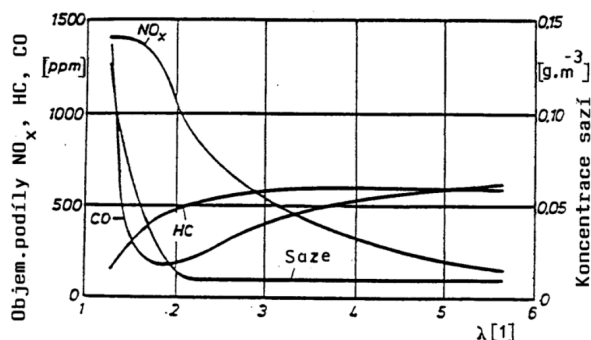
Pevné částice zahrnují hlavně saze, dále karbon, popel, vodu, palivo, olej. Opatření na snížení množství PM mají za následek zvýšení množství NO_x a naopak.

- Neúplnou oxidací směsi paliva při lokálním přebytku vzduchu $\lambda > 0,6$ (zážehové motory)
- neúplnou oxidací při nízké teplotě hoření

- ochlazení plyných organických látek ze spalovacího prostoru ve výfukovém potrubí a jejich následnou kondenzací
- snížením koncentrace plyných látek se tvorba částic potlačuje.



Obr. 2.4.1: Koncentrace surových emisí při různých provozních režimech vznětového motoru [5]



Obr. 2.4.2: Závislost objemového podílu NO_x , HC, CO na součiniteli přebytku vzduchu λ [5]

3 Měření emisí

Způsoby měření emisí jsou uváděny legislativně a vozidlové motory podléhají nej přísnějším předpisům. Měření probíhá v suchých plynech bez vlhkosti, kromě uhlovodíků (HC), které se měří ve vytápěném prostředí s teplotou okolo 200 °C [5], a to z důvodu, aby nekondenzovaly vyšší uhlovodíky. Výfukové plyny jsou ředěny v ředících tunelech velkým množstvím vzduchu. Bez ředění vzduchem by docházelo ke kondenzaci po jejich ochlazení. Přepočet vyprodukovaného množství škodlivin se určuje např. srovnáním podílu množství jedné škodliviny v surových a zředěných plynech nebo metodou CVS (Constant Volume Sampling - metoda konstantního průtoku ředěných výfukových plynů). Naměřené hodnoty se porovnávají s tabulkovými hodnotami, zda dané vozidlo splňuje emisní normy a tudíž podmínky homologace pro provoz na silničních komunikacích. Emisní norma určuje jaké množství spalin může vozidlo vyprodukovat. V

České republiky tyto normy upravuje zákon č. 56/2001 Sb., které vycházejí z norem Evropského společenství a Evropské hospodářské komise. Označení těchto norem je Euro + číslo normy.

Emisní norma Euro neomezuje zdaleka všechny vyprodukované škodliviny. Nejefektivnější způsob kontroly výfukových spalin by bylo měření všech složek výfukových spalin, ale takové provedení je velmi náročné a prakticky nerealizovatelné.

3.1 Emisní norma Euro

Emisní norma Euro je závazná norma, která stanovuje maximální povolené hodnoty výfukových exhalací zážehových a vznětových motorů v zemích Evropské unie. V současnosti pro nákladní vozidla je od roku 2008 platná norma Euro V limitující množství oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x), uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM). Výfukové plyny obsahují více škodlivých látek, jako je oxid uhličitý (CO₂), kterému je přisuzována souvislost s globálním oteplováním, ale jejich množstvím se norma nezabývá. Od roku 2009 musí normu Euro V splňovat všechna nově vyrobená vozidla. Od roku 2014 bude platit ještě přísnější norma Euro VI.

Je důležité vzít v úvahu, že Euro limity se nevztahují na skutečnou jízdu, ale pouze na předepsaný jízdní cyklus, takže překročení emisí normy ještě neznamená její nesplnění. K emisím vyšším, než odpovídá emisním limitům dochází např. při jízdě ve velmi hustém provozu, běhu motoru na volnoběh a neustálou akcelerací a decelerací v koloně vozidel.

Emise po studeném startu jsou v porovnání s emisemi zahřátého motoru v řádu jednotek až desítek vyšší.

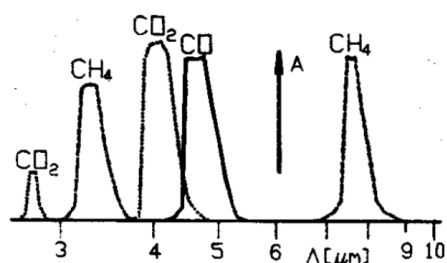
V tabulce 3.1.1 jsou uvedeny emisní limity kategorie N3.

Standard	Datum	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro I	1992-1995	4,5	8,0	1,1	0,36
Euro II	1995-1999	4,0	7,0	1,1	0,15
Euro III	1999-2005	2,1	5,0	0,66	0,1
Euro IV	2005-2008	1,5	3,5	0,46	0,02
Euro V	2008-2014	1,5	2,0	0,46	0,02
Euro VI	2014-	1,5	0,4	0,13	0,01

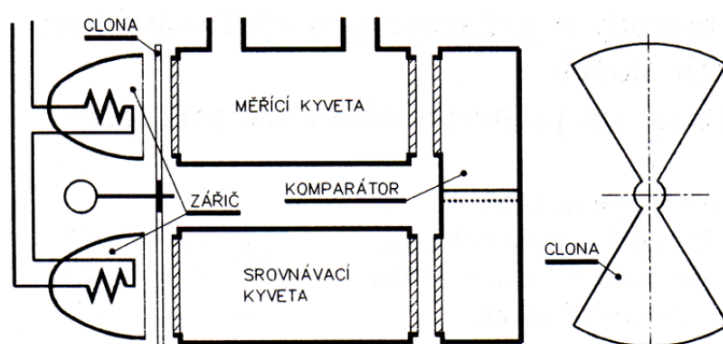
Tab. 3.1.1: Emisní limity pro kategorii N3 [14]

3.2 Měření emisí vznětových motorů

K analýze výfukových plynů se nejčastěji používají analyzátory, které jsou v současné době výhradně vícesložkového typu NDIR (NonDispersive Infrared Analyser neboli Nedisperzní infraanalyzátor) viz. obr. 3.2.2. Toto zařízení se používá pro měření koncentrace oxidu uhelnatého a uhlíčitého (CO , CO_2). Lze jím měřit i koncentrace individuálního uhlovodíku, ale odezva je pouze náhodná, takže koncentrace HC jsou pouze orientační. Tyto analyzátory pohlcují tepelné infračervené záření na různých vlnových délkách, charakteristické pro každou každou sloučeninu (CO_2 2,7 μm a 4,3 μm , CO 4,8 μm) viz. obr. 3.2.1.

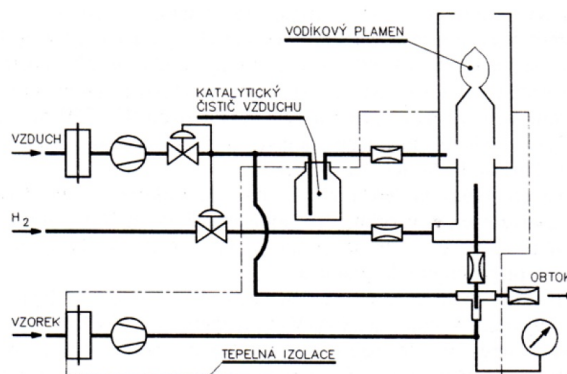


Obr. 3.2.1: Absorbční spektra [1]



Obr. 3.2.2: Non Dispersive Infrared Analyser [1]

Pro analýzu celkových HC a uhlovodíků se používá analyzátor FID (Flame Ionization Detector neboli plamenoionizační detektor) viz. obr. 3.2.3. Princip FID je takový, že na vodíko-vzduchový plamen se připojí elektrický potenciál a vznikne malý proud iontů. Přivedou-li se do hořící zóny organicky vázané uhlíky, průtočnému množství uhlovodíků odpovídá proud iontů.

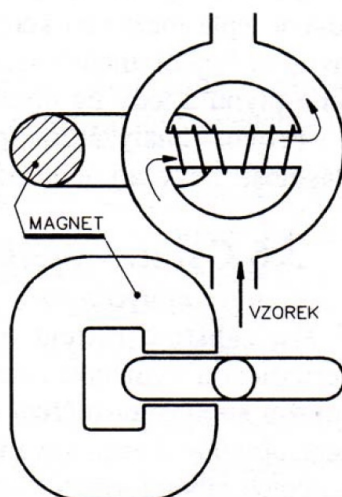


Obr. 3.2.3: Flame Ionization Detector [1]

Většina výfukových spalin vznětových motorů starší konstrukce obsahovala elementární uhlík, čemuž odpovídal viditelný černý kouř za vozidlem. Nanočástice obsahovaly cca desetinu celkové hmotnosti výfukových plynů.

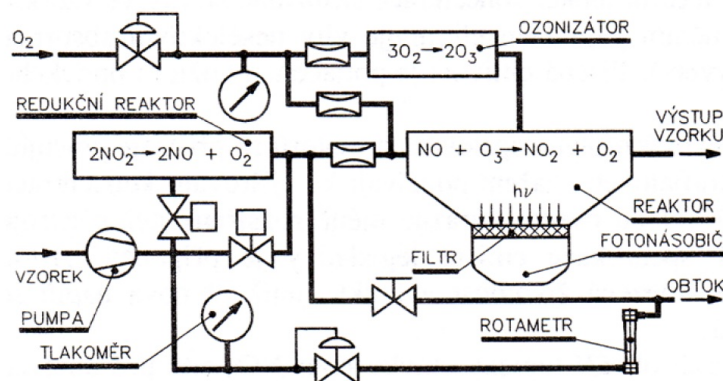
Nejprve se částice měřily opticky opacimetrem, který měří průchodnost světelných paprsků skrze sloupec výfukových plynů. Poté se částice měřily gravimetricky, tzn. vážení filtrů, na nichž je zachycena vrstva částic. Filtrem bylo prosáváno určité množství výfukových plynů při dané teplotě.

Pro měření kyslíku (O_2) se používá termomagnetický analyzátor viz. obr. 3.2.4. Kyslík má ,oproti ostatním plynům ve spalinách, největší permeabilitu a je tedy vtahován do magnetického pole. Postupný ohřev měřeného vzorku v magnetickém poli vyvolá sílu, která působí jen na kyslík a tím na jeho hmotnostní tok úměrný jeho obsahu.



Obr. 3.2.4: Termomagnetický analyzátor [1]

Pro stanovení koncentrace oxidů dusíku (NO_x) se používá Chemiluminiscenční analyzátor (CLA Chemiluminescent analyzer) viz. obr. 3.2.5. CLA má vysokou citlivost a selektivní možnosti rozsahu, tudíž se dá použít i na měření imisí. Chemická luminiscence měření NO , NO_2 využívá oxidace NO ozónem a měření fotonásobičem. Oxidace měřených spalin pomocí O_3 probíhá při teplotě okolo $650^{\circ}C$.



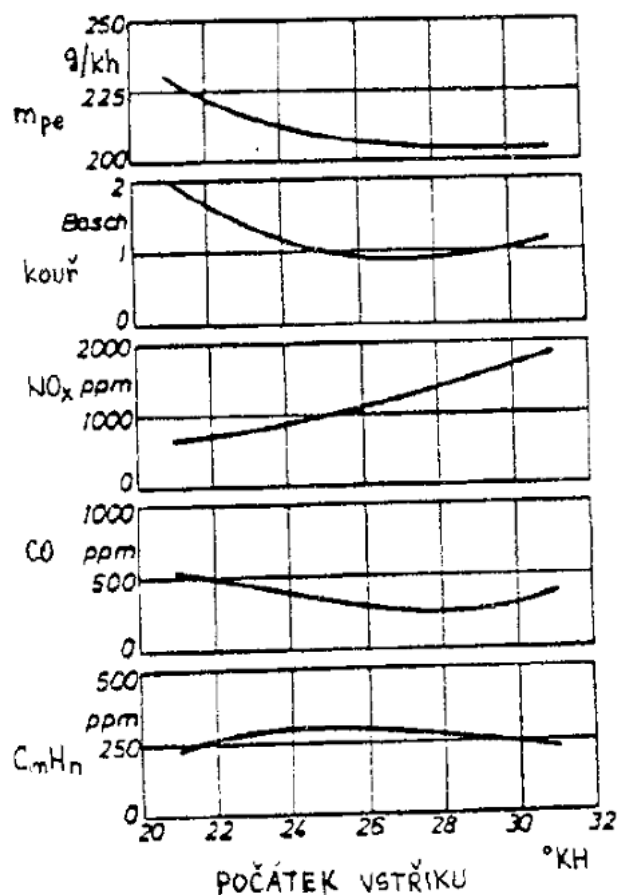
Obr. 3.2.5: ChemiLuminiscent Analyser [1]

4 Zařízení na redukci škodlivin

Při hoření směsi paliva se vzduchem ve spalovací komoře, vznikají vedlejší produkty. Hlavními vedlejšími produkty jsou NO_x , PM, CO a HC. Množství těchto nečistot obsažených ve výfukových plynech závisí na provozních podmínkách motoru. Na minimalizování emisí uvnitř motoru má největší podíl hlavně vstřikovací systém paliva, ale i na tvar spalovací komory, řízení víření vstříknutého paliva, přeplňování, recirkulace výfukových plynů.

S příchodem emisní normy Euro V v roce 2008 se zpřísnily požadavky na spalovací procesy nejen ve vznětových motorech. K získání nejlépe možného kompromisu mezi rozporupnými faktory, jako jsou oxidy dusíku NO_x a nízké hladiny hluku motoru, předvstřík a hlavní vstřík paliva musí probíhat v přesně stanoveném okamžiku a s přesným množstvím dávky paliva. Toho může být dosaženo pouze elektronicky řízeným systémem vstřikování paliva.

Není již déle možné snižovat hladiny emisí pouze vnitřními úpravami samotného motoru. V době, kdy je v platnosti emisní norma Euro V, není možné se obejít bez zařízení redukujících škodliviny.



Obr. 4.1: Vliv předstihu vstřiku paliva na škodliviny vznětového motoru [6]

- **Snížení škodlivin u vznětových motorů**

Na rozdíl od zážehového motoru, kde je možné ovlivnit tvorbu emisí v určitém rozmezí součinitele přebytku vzduchu λ , kvalitativní regulace vznětových motorů tuto možnost nemá.

- **Opatření před motorem**

Základem je návrh optimální plnicí soustavy s řízeným pohybem náplně válce, obvykle ve směru tečné rotace. To má největší význam při nízké plnicí energii, kdy dochází k horšímu rozprášení paliva. Cílem je co nejkratší doba pro smíšení vstřiku paliva se vzduchem a optimální průběh spalování.

- **Opatření v motoru**

Výrazný vliv na množství emisí, pro motor s přímým vstřikem, má předstih vstřiku paliva do válce, viz. obr. 4.1. Pozdějším vstřikem paliva do válce se snižuje množství NO_x , ale zvyšuje se spotřeba paliva, množství CO a kouřivost motoru. U přeplňovaného motoru lze snížení NO_x dosáhnout mezichlazením plnicího vzduchu.

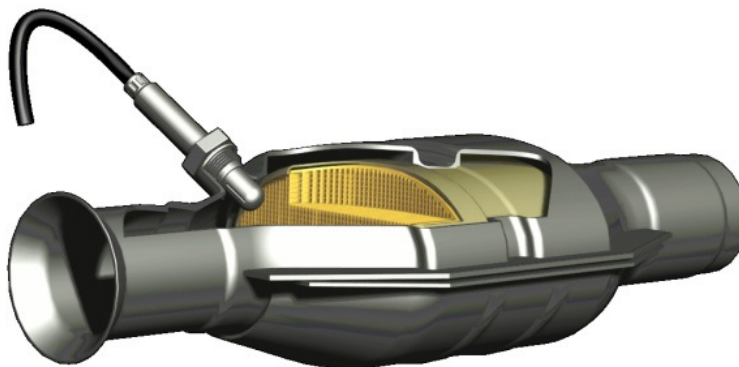
Emise nespálených uhlovodíků jsou závislé na provedení vstřikovací soustavy a trysky. Umístěním vstřikovacích otvorů do sedla trysky lze docílit snížení emisí nespálených uhlovodíků (HC) až o 75 % [6].

Kouřivost motoru lze ovlivnit zvýšením vstřikovacího tlaku a tím i jemnější rozprášení paliva.

- **Opatření za motorem viz. následující podkapitoly 4.1) až 4.5).**

4.1 Katalyzátory

Jedná se o zařízení, které má za úkol snižování emisí výfukových plynů, které jsou produktem nedokonalého spalování tak, aby výsledkem byly netoxické látky. Katalyzátory, viz. obr. 4.1.1 jsou součástí výfukového potrubí. Snižování emisí probíhá za pomoci chemických reakcí, při kterých se škodlivé látky přeměňují převážně na vodu, oxid uhličitý a další méně nebezpečné látky.



Obr. 4.1.1: Katalyzátor [23]

Na počátku 80. let bylo množství automobilů vybavené katalyzátorem zanedbatelné. Dnes je ve všech vyspělých zemích automobil bez katalyzátoru jen těžko představitelný. Důvodem je stále se zpřísňující emisní legislativa.

Hlavním úkolem katalyzátoru je přeměna oxidů dusíku, uhlovodíku a oxidu uhelnatého na dusík, vodní páru a oxid uhličitý. Katalyzátor se skládá z vrstev drahých kovů, které reagují s produkty nedokonalého hoření s oxidy dusíku a kyslíkem zbylým po spalování. K urychlení oxidačních procesů (dodání kyslíku O_2) se využívá převážně platina, příp. palladium. K urychlení redukčních procesů (odebrání kyslíku O_2) se využívá rhodia, příp. ruthenia nebo osmia. Na požadované reakce jsou tyto drahé kovy nejčastěji používány. Kromě těchto kovů je také možné použít dle požadované reakce oxidy kovů CuO , NiO , kterých se využívá zřídka, protože v porovnání s drahými kovy vykazují nižší trvanlivost při vysokých teplotách a pomalejší průběh reakce. Katalyzátor je v pracovním režimu až při dosažení teploty cca $200^{\circ}C$. K chemickým reakcím, (oxidačním a redukčním) dochází v rozmezí teplot 200 až $600^{\circ}C$.

Možné problémy při provozu katalyzátorů:

- tzv. „otrávení“ katalyzátoru má za následek snížení účinnosti. K „otrávení“ Katalyzátoru docházelo nejčastěji zanesením olovnatými přísadami obsaženými v benzínu. Zanesení bylo tak významné, že si vynutilo zamezení olovnatých přísad v benzínu.
- při vysokých teplotách okolo 1000 °C může dojít k tepelnému stárnutí, dokonce i k propálení katalyzátoru
- zvýšení protitlaku ve výfukovém potrubí, které má zvýšení spotřeby paliva.

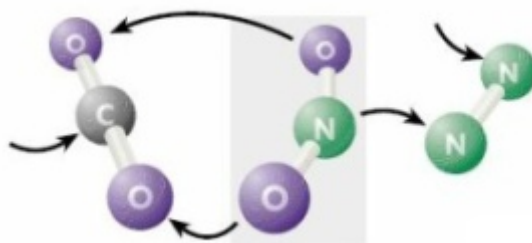
Při studeném startu není katalyzátor nějakou dobu účinný a nedochází k přeměně výfukových plynů na netoxické látky. Z tohoto důvodu se do výfukové soustavy zařazuje blíže k motoru rozměrově menší předkatalyzátor, který dosahuje dříve provozní teploty.

Katalyzátory se rozlišují podle provedení na:

- oxidační – snižují CO a HC
- redukční – snižují NO_x
- kombinované, neboli trojcestné – snižují všechny tři základní škodliviny

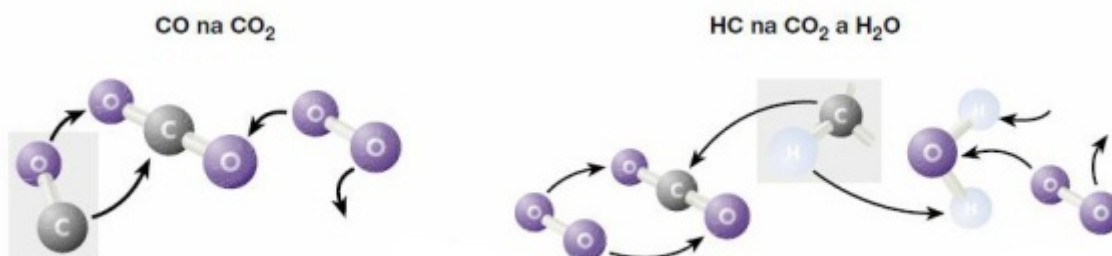
Chemické reakce probíhající v katalyzátorech:

- **Redukce** – přeměna oxidů dusíku (NO_x) na dusík (N₂) a oxid uhličitý (CO₂), viz. obr. 4.1.2.



Obr. 4.1.2: Redukční reakce [23]

- **Oxidace** – přeměna oxidu uhelnatého (CO) na oxid uhličitý (CO₂), zároveň oxidace HC na vodu (H₂O) a oxid uhličitý (CO₂), viz. obr. 4.1.3. V podstatě jde o dodatečné spalování.



Obr. 4.1.3: Oxidační redukce [23]

Technické provedení katalyzátoru

Pro každý typ motoru je nutné navrhnout vlastní katalyzátor. Účinnost katalyzátoru závisí na rychlosti požadovaných reakcí, která závisí na velikosti plochy styku výfukových spalin s reagujícími látkami a na rychlosti průtoku výfukových plynů katalytickou komorou. Rychlost průtoku se mění v závislosti na velikosti objemu motoru, provozním režimu a obsahu komory.

Základní požadavky katalyzátorů

- chemická aktivita od nižších teplot výfukových spalin. Z tohoto důvodu se využívají ušlechtilé kovy Pt, Pd, Rh.
- nízký hydraulický odpor a velká činná plocha
- odolnost proti vibracím a rázům
- odolnost vysokým teplotám, maximální pracovní teplota do 850 °C, krátkodobě až 1000 °C.
- Stálost chemické aktivity po dobu životnosti vozidla.

Katalyzátor tvoří plechový obal a aktivní katalytické hmoty. K docílení co největší možné reakční plochy, se aktivní plocha nanáší na povrch chemicky inertních materiálů, které se podle provedení rozdělují na sypané (už se příliš nepoužívají, v Evropě vůbec), monolitické keramické a kovové katalyzátory.

4.2 Recirkulace výfukových plynů

Další možností pro snížení emisí oxidů dusíku (NO_x) vznětového motoru je systém recirkulace výfukových plynů (Exhaust Gas Recirculation). Princip systému EGR je takový, že část výfukových plynů je odvedena z výfukového potrubí přes výměník tepla (chladič) zpět do sacího potrubí motoru, viz, obr. 4.2.1. Úkolem není jen snížení maximálních teplot spalování, ale spíše nahrazení přebytečného kyslíku inertním výfukovým plynem. Při nízkém zatížení motoru je možné recirkulovat velké množství výfukových plynů, ale jen do velikosti směšovacího poměru na hranici kouřivosti. S větším množstvím recirkulovaných plynů se zvyšuje kouřivost motoru. Výfukové plyny se nerecirkulují při plném zatížení, kde je zároveň tvorba emisí NO_x nejvyšší.

Podle požadovaného stupně na recirkulaci jsou různé způsoby řízení zpětného ventilu systému. V nejjednodušším provedení je recirkulované množství závislé na zatížení motoru a změně protitlaku výfukových plynů. V tomto případě je použito jednoduchého membránového ventilu. Pro lepší přizpůsobení recirkulace na průběh zatížení je možné použít dvoustupňový ventil se dvěma membránami. K optimálnímu snížení je potřeba kontinuálního řízení s regulátorem s proměnlivým řídicím podtlakem, který ovládá zpětný ventil.

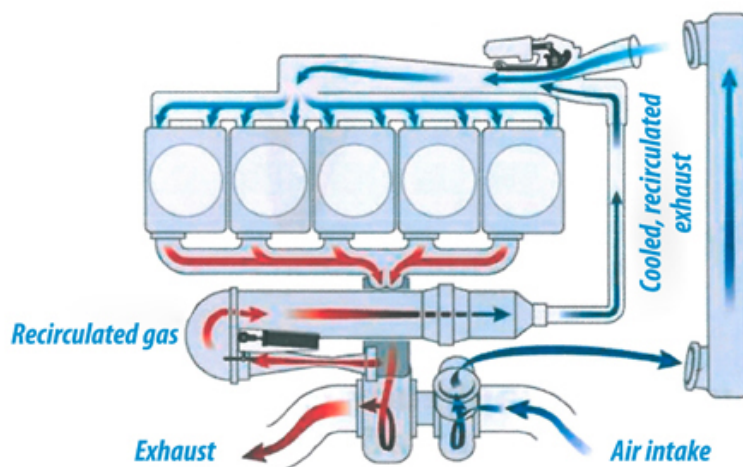
Nevýhodou systému EGR je snižování výkonu motoru, kvůli menšímu množství kyslíku ve spalovací komoře a tím i menší množství spáleného paliva, čímž se vytvoří méně tepla a zároveň méně energie, která se přeměňuje na mechanickou práci. Na druhou stranu systém EGR splňuje emisní normu Euro IV a vyšší.

Způsoby recirkulace:

- vnitřní recirkulace: zpětné nasátí spalin náležitým časováním ventilů. Účinek je nižší, kvůli absenci chladiče.
- vnější recirkulace: část výfukových plynů je nasávána přímo do spalovací komory

Množství recirkulovatelného plynu má také dopad na zpoždění vznětu. Pokud není rychlost recirkulace dostatečná při nízkém zatížení, průtah vznětu je tak velký, že difuzní plamen, typický pro vznětové motory, je silně zeslaben a spalování je možné pouze po

smísení velkého množství vzduchu a paliva. Tato částečná homogenizace se používá v nových (p)HCCI spalovacích procesech k dosažení extrémně nízkých hodnot NO_x a malého množství částic, produkovaného za nízkého zatížení.



Obr. 4.2.1: Princip recirkulace výfukových plynů [17]

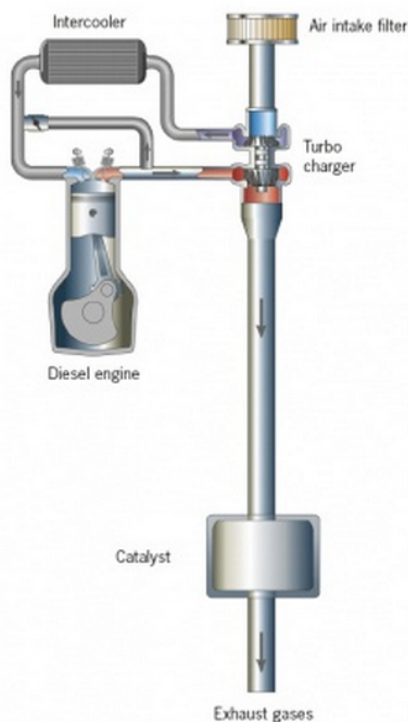
4.2.1 Nízkotlaká a vysokotlaká recirkulace

Technologie nízkotlaké recirkulace má velký potenciál pro snižování emisí NO_x . Nízkotlaká a vysokotlaká recirkulace jsou dva výrazně rozdílné typy EGR systému, které jsou momentálně dostupné, viz. obr. 4.2.1.1. Vysokotlaké EGR recirkuluje výfukové plyny mezi dvěma vysokotlakými body – mezi výfukovým a sacím potrubím (ve směru mezichladiče plnicího vzduchu). Nízkotlaké EGR recirkuluje výfukové plyny mezi dvěma nízkotlakými body – koncovka výfukového potrubí (po směru filtru částic) a vstupní potrubí do turbodmychadla (ve směru vzduchového filtru). Když je část výfukových plynů recirkulována do vstupního potrubí, klesne množství kyslíku a zároveň se zvýší tepelná kapacita, díky které jsou nižší maximální spalovací teploty a tím pádem menší tvorba NO_x .

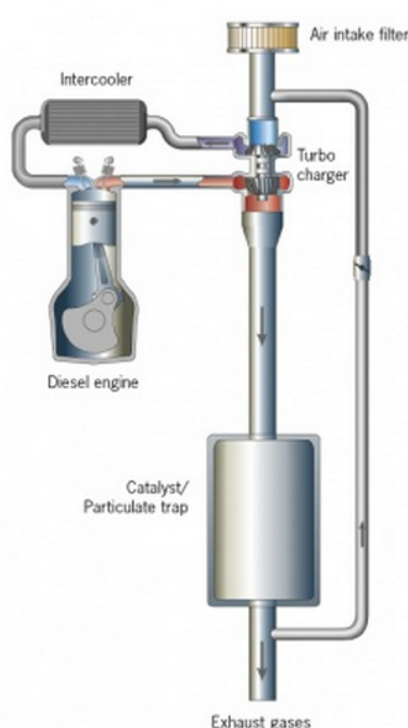
Snížení množství kyslíku má za následek zvýšení tvorby pevných částic. A proto je nezbytné řízení recirkulovaného množství různými provozními režimy motoru.

Problém s dosažením dostatečné rychlosti recirkulace u nízkotlakého systému neexistuje. Dosažení požadované rychlosti se obejde bez snížení účinnosti turbodmychadla. Vysokotlaké recirkulování nefiltrovaných výfukových plynů způsobuje znečištění motoru a přimíchání sazí do oleje. Protikladně nízkotlaká recirkulace recirkuluje spaliny bez částic zachycených ve filtru částic.

High Pressure EGR System



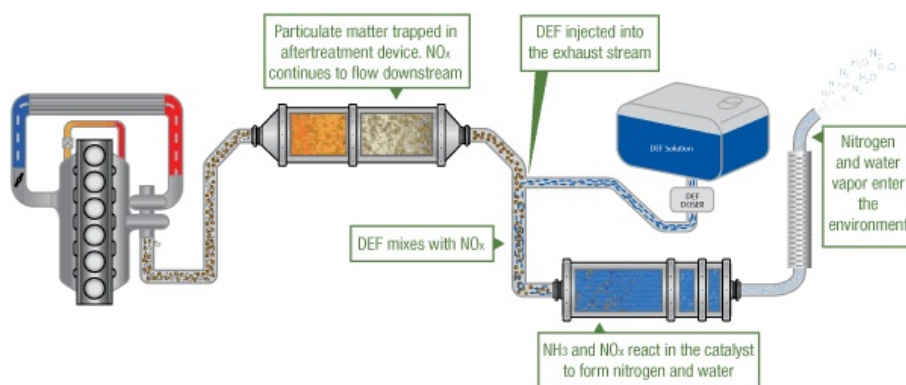
Low Pressure EGR System



Obr. 4.2.1.1: Vysokotlaká recirkulace a nízkotlaká recirkulace [18]

4.3 Systém SCR

Systém selective catalytic reduction (SCR) využívá k čištění spalin selektivní katalytické redukce viz. obr. 4.3.1 a přeměňuje emise NO_x za přítomnosti kyslíku na neškodný dusík N_2 a vodu H_2O pomocí speciálního aditiva (AdBlue) na bázi močoviny nebo amoniaku a zároveň snižuje spotřebu paliva.



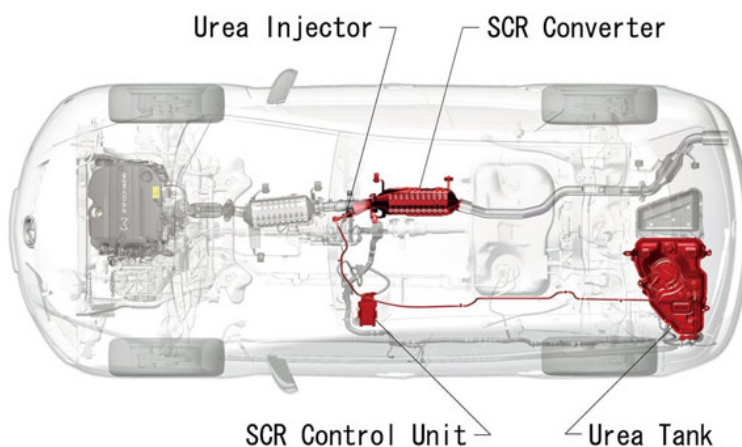
Obr. 4.3.1: Princip selektivní katalytické redukce [19]

Na rozdíl od zásobníkového katalyzátoru NO_x (NSC), systém SCR pracuje nezávisle na zatížení motoru a nemá vliv na spotřebu paliva. Naopak u NSC odstranění a přeměna emisí NO_x spotřebu paliva zvyšuje.

Slovo selective, neboli „selektivní/výběrový“ znamená, že redukční činidla oxidují právě s kyslíkem obsaženým v oxidech dusíku namísto s molekulárním kyslíkem, který je obsažen v mnohem vyšším množství ve výfukových spalínách. V tomto případě se amoniak (NH_3) jeví jako vysoce redukující činidlo. Na druhou stranu potřebné množství amoniaku vyžaduje vyšší požadavky na bezpečnost kvůli jeho toxicitě. Nicméně NH_3 může být získáván z netoxických nosných látek, jako jsou močovina nebo uhličitán amonný. Močovina se osvědčuje jako dobrý katalytický nosič a také je šetrná k životnímu prostředí a hlavní předností je chemická stabilita. Při koncentraci 32,5 % močoviny ve vodě je bod tuhnutí $-11\text{ }^\circ\text{C}$.

K přesnému měření redukčních činidel ve spalínách byl vyvinut systém DENOXTRONIC 1, který je odolný proti zamrznutí. Hlavní součásti jsou vyhřívané, aby byl systém funkční i krátce při studeném startu. Kapalné aditivum, složené z vodního roztoku a 32,5% syntetické močoviny je pod obchodním označením AdBlue. Tento systém obsahuje modul, který dodává AdBlue požadovaného tlaku do dávkovacího modulu. Dávkovací modul přesně měří množství roztoku a přidává stlačený vzduch. Dávkovací trubice rozděluje a dává roztok ve výfukovém potrubí. Řídící jednotka k přenosu informací s motorem je umístěna v dávkovacím modulu.

Pro správnou funkci a okamžitou reakci na rychlé a velké změny ve složení i průtoků výfukových plynů, je nutné přesné řízení, seřízení a pečlivá údržba systému SCR. Provozní účinnost systému SCR je cca $200\text{ }^\circ\text{C}$. Uložení prvků systému je vyznačeno na obr. 4.3.2.



Obr. 4.3.2: Rozmístění prvků systému SCR ve vozidle [20]

4.4 Filtr pevných částic

Filtr pevných částic (diesel particulate filter DPF) se svým provedením podobá katalyzátoru, viz. obr. 4.4.1 a používá se k odstranění částic sazí vyprodukovaných vznětovým motorem. Jako materiál se používá porézní keramika a nyní jsou ve vývoji filtry se slinutými kovy. Účinnost filtru se odvíjí od velikosti pórů, kterými výfukové plyny procházejí. S rostoucím zatížením motoru se zvyšuje průtokový odpor a tím pádem i protitlak ve výfuku. Tlakový úbytek na filtru má nepříznivý vliv na spotřebu paliva a výkon motoru.

Keramické filtry pevných částí

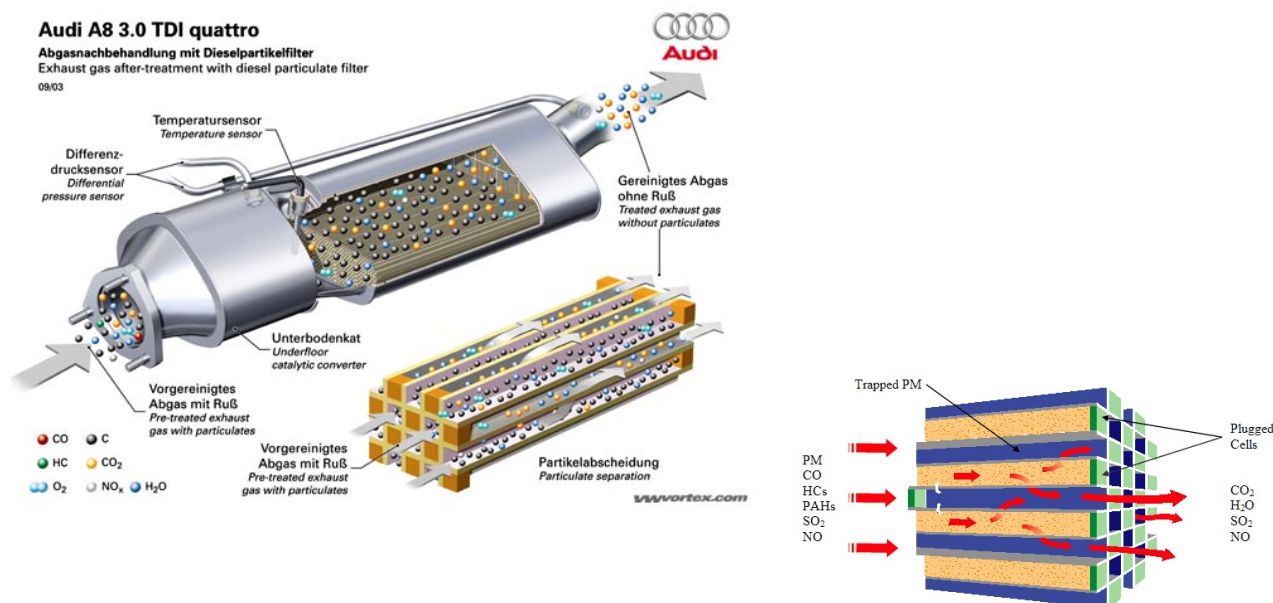
Keramické filtry pevných částic mají strukturu podobnou včelí plástve, vyrobenou z karbidu křemíku nebo cordiéritu a vyznačuje se velkým množstvím souběžných, většinou čtvercových kanálků viz. obr. 4.4.2. Tloušťka stěny kanálku se běžně pohybuje od 300 do 400 μm . Hustota kanálku na jeden čtvereční palec (2,54 centimetru) je mezi 100 až 300 kanálky.

Kanálky jsou na každém konci prostřídaně zavřené keramickou zátkou, aby výfukové plyny byly nuceny procházet skrz póry keramiky podél stěn. Částice sazí jsou vlivem difúze transportovány do pórovitých stěn, kde jsou zadržovány. Na povrchu stěn kanálků se tvoří vrstva sazí. Po určité době je nutné saze odstranit, neboli regenerovat filtr zahřátím na teplotu okolo 600°C [6]. Při této teplotě se saze spalují na oxid uhličitý CO_2 a lze ji dosáhnout pouze při plném zatížení motoru. Pro udržení takto vysoké teploty se používají izolace před filtrem.

Pro zlepšení regeneračního účinku se povrch keramiky nanáší katalytickými vrstvami ušlechtilých kovů, jako je např. mangan. To má za následek posunutí teploty spalování sazí až ke 200°C [6]. Tato úprava má za následek značné zvýšení ceny filtru. Rovnoměrné tepelné rozložení v keramickém bloku zvyšuje životnost filtru. Vnější obal filtru je z nerezového plechu a vnitřní keramická vložka je citlivá na mechanické rázy a tudíž musí být pružně uložena.

V současné době jsou testovány elektrostatické filtry, ionizující letící částice ve výfuku, které se shlukují a následně odstřeďují v cyklónu. Problémem je zatím jejich velikost.

Filtr pevných částic je v pracovním režimu až při dosažení teploty cca 200°C.



Obr. 4.4.1: Filtr pevných částic [21] Obr. 4.4.2: Detail filtru pevných částic [24]

4.5 Lambda sonda

Lambda sonda, viz. obr. 4.5.1, je zařízení, které vyhodnocuje množství kyslíku ve výfukových plynech a tyto informace předává řídicí jednotce vozidla, která následně upravuje systém vstřikování a tím snižuje spotřebu i emise. Lambda sonda se umísťuje do výfukového potrubí.

Lambda sonda zajišťuje co nejprůběžnější složení výfukových plynů, prostřednictvím jejich recirkulace a okamžiku vstřiku paliva a tlaku plnicího vzduchu.

Princip lambda sondy je založen na rozdílu napětí mezi elektrodami, kterými jsou keramické destičky s nanesenými vrstvami. Jedna destička je na vnějším vzduchu a druhá ve výfukovém potrubí. Napětí vyhodnocuje řídicí jednotka, která spočítá hodnotu přebytku vzduchu λ .



Obr. 4.5.1: Lambda sonda [22]

5 Měření teploty výfukových plynů těžkého vozidla v reálném provozu

5.1 Úvod k měření

Cílem projektu MEDETOX, jehož součástí je tato bakalářská práce, je měření a vzorkování výfukových emisí v závislosti na provozních podmínkách těžkého vozidla v reálném provozu, zejména při vyšší hustotě v městské části, případně na dopravně vytížených úsecích.

Cílem této bakalářské práce je:

- a) návrh a konstrukce ředicího tunelu, který slouží k odběru vzorků výfukových plynů a k jejich následnému ředění se vzduchem,
- b) ověření funkčnosti tunelu při měření v reálném provozu,
- c) zpracování a vyhodnocení teplot výfukových plynů v závislosti na okamžité rychlosti vozidla a porovnání výsledků při různé hustotě dopravy.

Představa měření byla taková, že po sestrojení a otestování ředicího tunelu se tunel upevní na nákladní automobil do blízkosti výfukového systému a následně se bude pohybovat v reálném městském provozu. Ředicí tunel bude odebírat vzorky výfukových plynů, zároveň je ředit vzduchem a vzniklou směs dopraví do vzorkovacího zařízení. Termočlánek bude udávat hodnoty teplot výfukových plynů v závislosti na rychlosti vozidla a provozních podmínkách motoru.

Výsledkem by měla být teplotní závislost výfukových plynů a následně by měla být vedena diskuze na základě teoretických poznatků uvedených v této práci.

Měření se uskutečnilo v reálném provozu hlavního města Prahy a snahou bylo nashromáždit data při průjezdu stejných úseků, ale za rozdílné hustoty provozu, a to za vysoké hustoty, kde průměrná rychlost vozidla dosahovala cca 15 km/h, a za nízké hustoty, kde průměrná rychlost vozidla dosahovala cca 55 km/h.

Měření probíhalo na nákladním voze Iveco Trakker. Ředicí tunel spolu s termočlánkem byl umístěn co nejblíže ke koncovce výfukového potrubí.

5.1.1 Úvod k ředění výfukových plynů

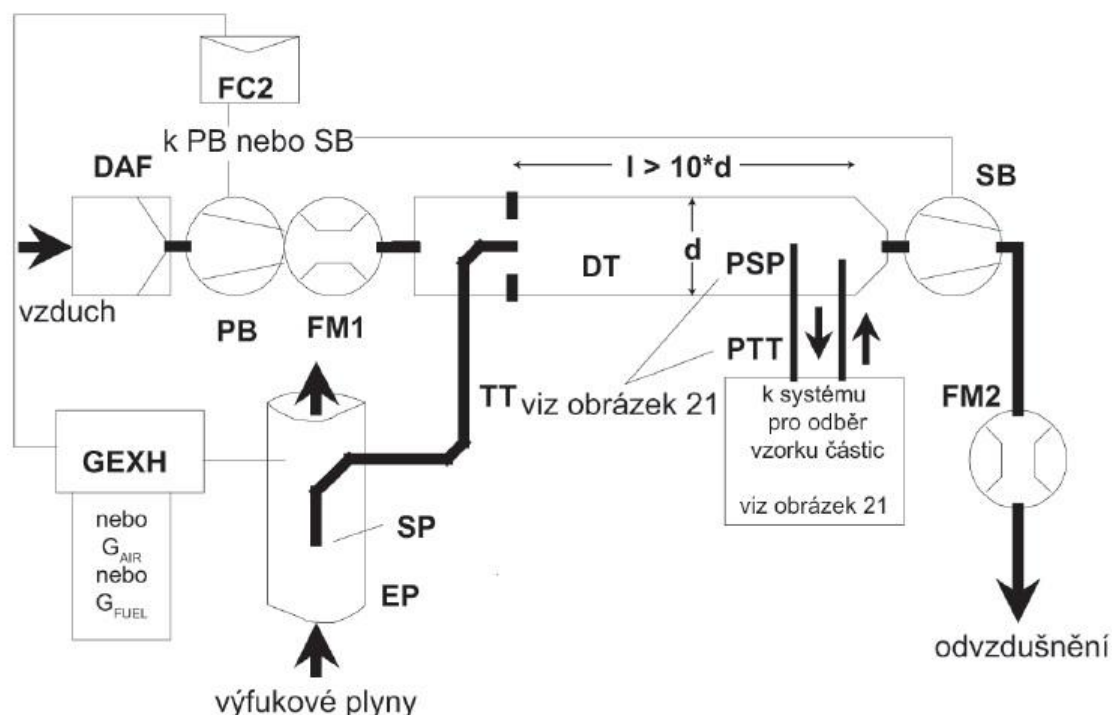
Předpis č. 49 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) udává 2 druhy systémů pro ředění výfukových toků, a to na systém, kterým procházejí veškeré zředěné výfukové plyny a na systém, kterým prochází jen část zředěných výfukových plynů.

V této bakalářské práci je použit systém s ředěním části toku.

Nevýhodou tohoto systému jsou ztráty částic v odběrovém potrubí, problematické určení dělicího poměru a samotný odběr vzorků výfukových plynů.

Schéma systému s ředěním části toku, s řízením průtoku a s odběrem dílčího vzorku je na obr. 5.1.1, kde se surové výfukové plyny z výfukového potrubí EP převádí odběrovou sondou SP a přenosovou trubicou TT do ředicího tunelu DT. Rozdělení výfukových plynů a průtok do DT je řízen regulátorem průtoku FC2, který má na starosti regulaci tlakového ventilátoru SB. To je umožněno tím, že vzorek odebraný ze systému pro odběr částic se vrací do DT. G_{EXHW} , G_{AIRW} nebo G_{FUEL} se mohou použít jako řídicí signály pro FC2. Průtok ředicího vzduchu se měří průtokoměrem FM1, celkový průtok průtokoměrem FM2. Ředicí poměr se vypočte z těchto dvou průtoků. [8]

Tato práce se z tohoto systému zabývá pouze ředicím tunelem DT.



Obr. 5.1.1: Schéma systému s ředěním části toku, s řízením průtoku a s odběrem dílčího vzorku [8].

5.1.2 Rizika specifická pro městský provoz

S neustále se zvyšující intenzitou dopravy jsou v městském prostředí a zejména na vytížených tazích zvláště problematické velké množství produkovaných pevných částic. A to z důvodu, že provoz v takovémto prostředí je charakteristický neustálou změnou provozního režimu motoru, a to akcelerací a decelerací a nízkou průměrnou rychlostí vozidel. Při akceleraci, dochází ke zvýšení přívodu paliva do motoru a tím i zvýšení množství emitovaných částic, a to jak u zážehových, tak vznětových motorů. Přičemž k největším koncentracím dochází právě při zvýšení přívodu paliva ještě za nižších otáček, kdy je účinnost turbodmychadla nízká.

5.2 Ředicí tunel

Nejprve pro samotné měření bylo nutné navrhnout a sestavit ředicí tunel, viz. obr. č. 5.2.3, který by byl schopen odebírat část výfukových plynů a následně je ředit daným množstvím vzduchu. Navržený model tunelu byl nejprve vymodelován ve 3D CAD softwaru Catia V5 viz. obr. 5.2.1 a obr. 5.2.2.

Ředicí tunel se skládá z odběrové sondy výfukových plynů, vložené do koncovky výfukového potrubí vozidla, a z vedení s přívodem vzduchu z kompresoru. V ředicím tunelu docházelo k mísení obou médií.

Tok odběrovou trubicí vzorků a tok nasávaného vzduchu ředicího tunelu je v poměru 1:5 za plného zatížení, 1:10 v optimálním provozním režimu (jízda v oblasti nejvyššího točivého momentu) a 1:40 při běhu motoru na volnoběh.

Ředicí tunel byl navržen tak, aby byl schopen odebírat vzorky výfukových spalin, ředit je vzduchem a zředěnou směs dopravit dále do vzorkovacího zařízení a zároveň schopen měřit okamžitou teplotu výfukových spalin. K měření teploty byl použit termočlánek typu K, umístěný v koncovce výfukového potrubí. Dalším požadavkem bylo umístění tunelu co nejbližší místu odebírání vzorků, čemuž se musely přizpůsobit rozměry tunelu, délka potrubí a rozmístění úchyty.

Výfukové plyny na konci výfukového systému dosahují teplot až 400 °C, proto byla za materiál tunelu zvolena nerezová ocel DIN 1.4307 a v případě odběrové sondy a přívodu vzduchu materiál DIN 1.4401, které při těchto teplotách vykazují teplotní stálost.

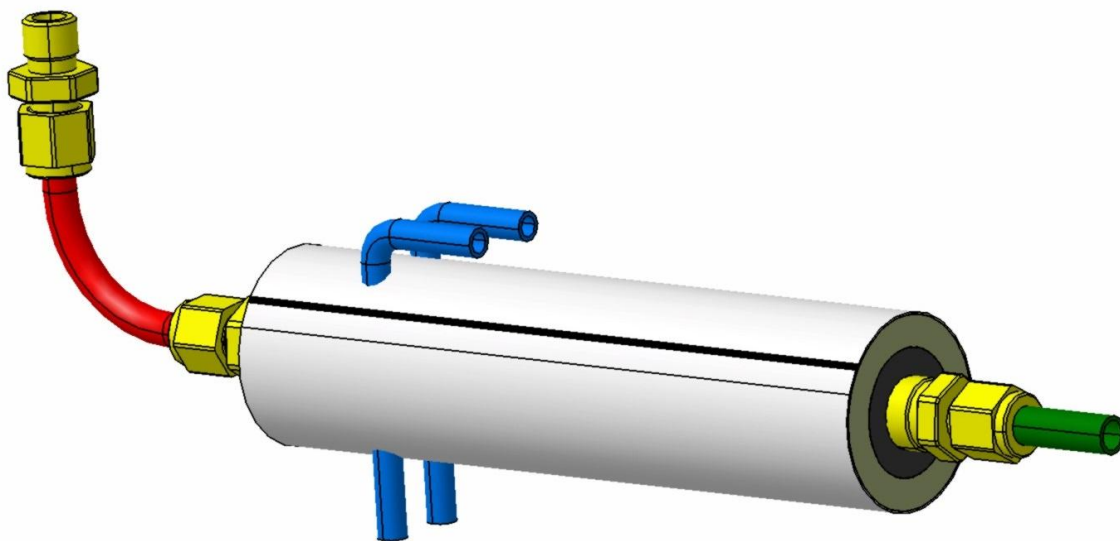
Aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků od horké koncovky výfuku a jiných nepříznivých vlivů, byl zkonstruovaný ředicí tunel obalen izolací s minerální vatou viz. obr. 5.2.1.

Z důvodu vysoké rychlosti proudění vzduchu a zamezení kondenzaci plynů bylo snahou použít přívodní vedení vzduchu o co nejmenším průměru. Vnitřní průměr 5 mm (vnější 7 mm) vyhovoval jak konstrukci, tak výše uvedeným požadavkům.

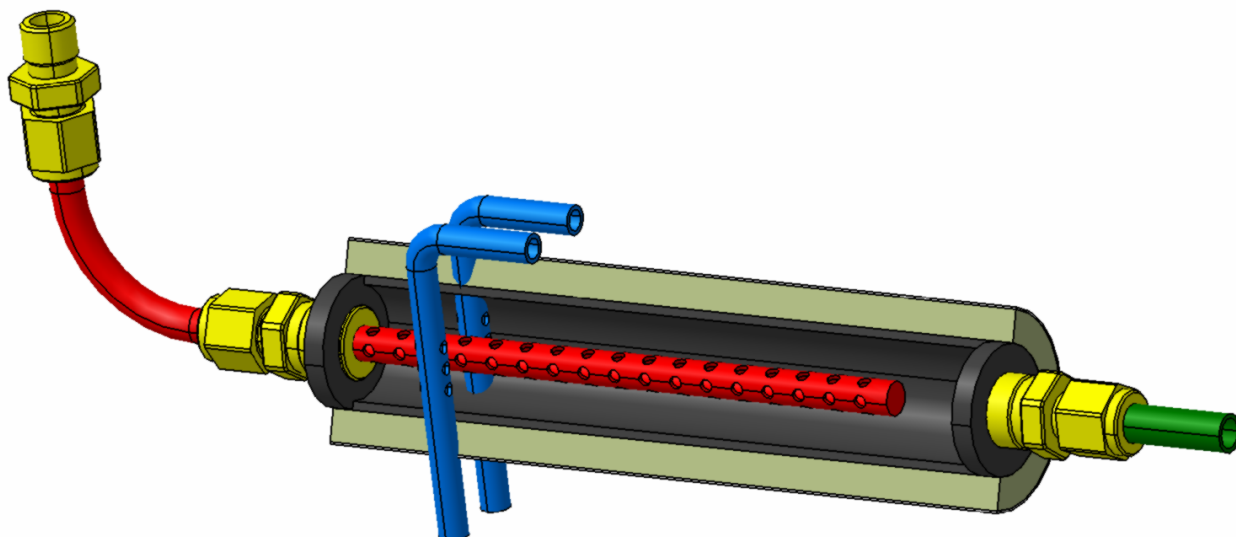
Při tlakové zkoušce těsnosti tunelu v laboratoři, byla zjištěna netěsnost svaru jednoho z přívodů vzduchu. K této netěsnosti došlo omylem při přivařování vedení přívodu vzduchu, která měla za následek úbytek tlaku v ředicím tunelu. K odstranění této netěsnosti byla použita výfuková pasta, viz. obr. 5.2.4, rezistentní až do 700 °C. Při následné tlakové zkoušce k žádnému úbytku tlaku již nedošlo, tudíž volba zmíněné výfukové pasty se osvědčila jako správné řešení.

Následně byl ředicí tunel otestován a úspěšně v průběhu celého měření na voze Iveco Trakker.

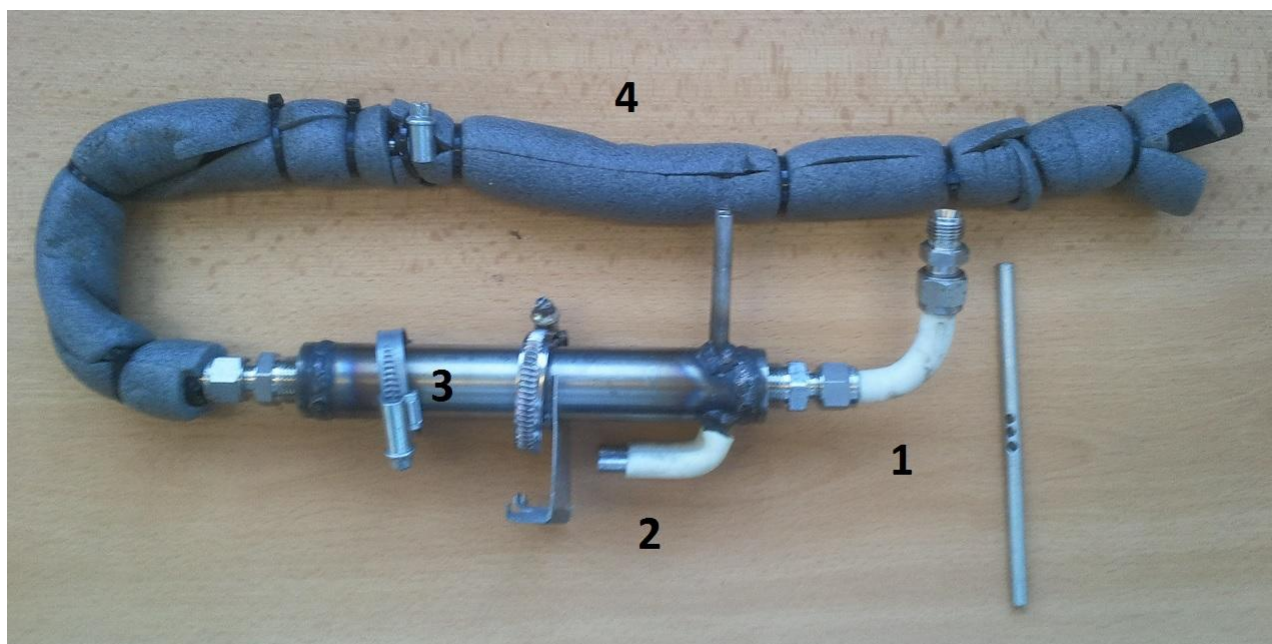
Ředicí tunel je součástí přenosného zařízení pro proporcionální odběr vzorků výfukových plynů. Součást se využívá v projektu MEDETOX (www.medetox.cz).



Obr. 5.2.1: Návrhový model ředicího tunelu v 3D CAD softwaru Catia V5



Obr. 5.2.2: Řez návrhovým modelem ředícího tunelu v 3D CAD softwaru Catia V5



Obr. 5.2.3: Sestrojený ředící tunel bez izolace

1) přívod výfukových plynů, 2) přívod vzduchu, 3) ředící tunel, 4) zředěná směs



Obr. 5.2.4: výfuková pasta

5.3 Měřicí podmínky

5.3.1 Měření nákladní automobil

K měření bylo vybráno a poskytnuto nákladní vozidlo Iveco Trakker MP 260 E 38 W, roku výroby 2002 viz. obr. 5.3.1.1, spadající do kategorie nákladních automobilů N3. Parametry nákladního automobilu jsou uvedené v tab. 5.3.1.1. Vozidlo nebylo vybaveno žádným systémem na redukci výfukových spalin a splňovalo emisní normu Euro III. Emisní limity Euro III pro kategorii N3 jsou uvedeny v tab. 5.3.1.2.

Iveco Trakker MP 260 E 38W	
Typ motoru	Vznětový
Zdvihový objem [ccm]	12880
Nejvyšší výkon [kW/ ot/min]	272
Pohotovostní hmotnost [kg]	14300
Převodovka	Manuální
Rok výroby	2002

Tab. 5.3.1.1: Parametry vozidla

Standard	Platnost	CO [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	HC [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro III	1999-2005	2,1	5	0,66	0,1

Tab. 5.3.1.2: Euro III – emisní limity kategorie N3



Obr. 5.3.1.1: Iveco Trakker MP 260 E 38 W, r. v. 2002

5.3.2 Odběrné a měřicí zařízení

K odběru vzorků výfukových spalin byl zkonstruován ředicí tunel, který zároveň plnil funkci ředění vzorků výfukových plynů se vzduchem. Ředicí tunel byl připevněn ke koncovce výfukového potrubí viz. obr. 5.3.2.1 a obr. 5.3.2.2. Směs výfukových plynů se vzduchem byla dále vedena do vzorkovacího zařízení výfukových plynů viz. obr. 5.3.2.3, navrženého a zkonstruovaného pro projekt MEDETOX.

Ředicí tunel se skládá z odběrové trubky, vložené do koncovky výfukového potrubí vozidla a z vedení s přívodem vzduchu z kompresoru. K získání co nejlepších výsledků měření bylo nutné ředicí tunel upevnit co nejblíže místu odebírání vzorků, protože částice rychle mění své parametry a se zvětšující se délkou potrubí dochází k jejich kondenzaci a tím k ovlivnění výsledků. Tepelnému ovlivnění ředicího tunelu od horké koncovky výfuku, a

tím případnému ovlivnění výsledků měření, bylo zamezeno obalením tunelu do izolace.

Pro měření teplot výfukového plynu byl použit termočlánek typu K, umístěný rovněž v koncovce výfukového potrubí, použitelný v rozmezí teplot - 100 až + 900 °C s průměrem drátu 1,5 mm. Termočlánek udává hodnoty ve formě napětí v milivoltech, které jsou převedeny AD převodníkem na proudový výstup. Dolní hranice převodníku je 4 mA, které odpovídají teplotě -100 °C a horní hranice udává 20 mA, které naopak odpovídají +900 °C. Pro sběr dat byl použit napěťový vstup, převod hodnot byl realizován pomocí odporu vzorkovacího zařízení 248,8 ohmů a Ohmovým zákonem byl napěťový spád čitelný ve vzorkovacím zařízení.

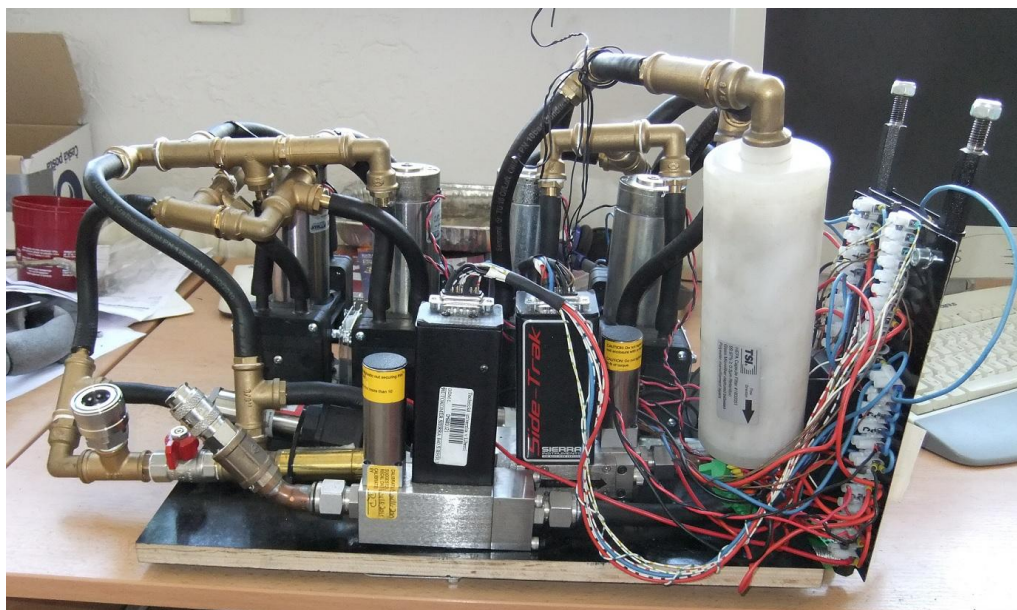
Vzorkovací zařízení ze vzorků směsi výfukových plynů se vzduchem vyhodnocuje množství jednotlivých složek výfukových plynů (HC, CO, NO_x, CO₂, O₂, PM), jejichž vyhodnocení není součástí této práce.



Obr. 5.3.2.1: připevnění tunelu



Obr. 5.3.2.2: umístění tunelu



Obr. 5.3.2.3 Vzorkovací zařízení

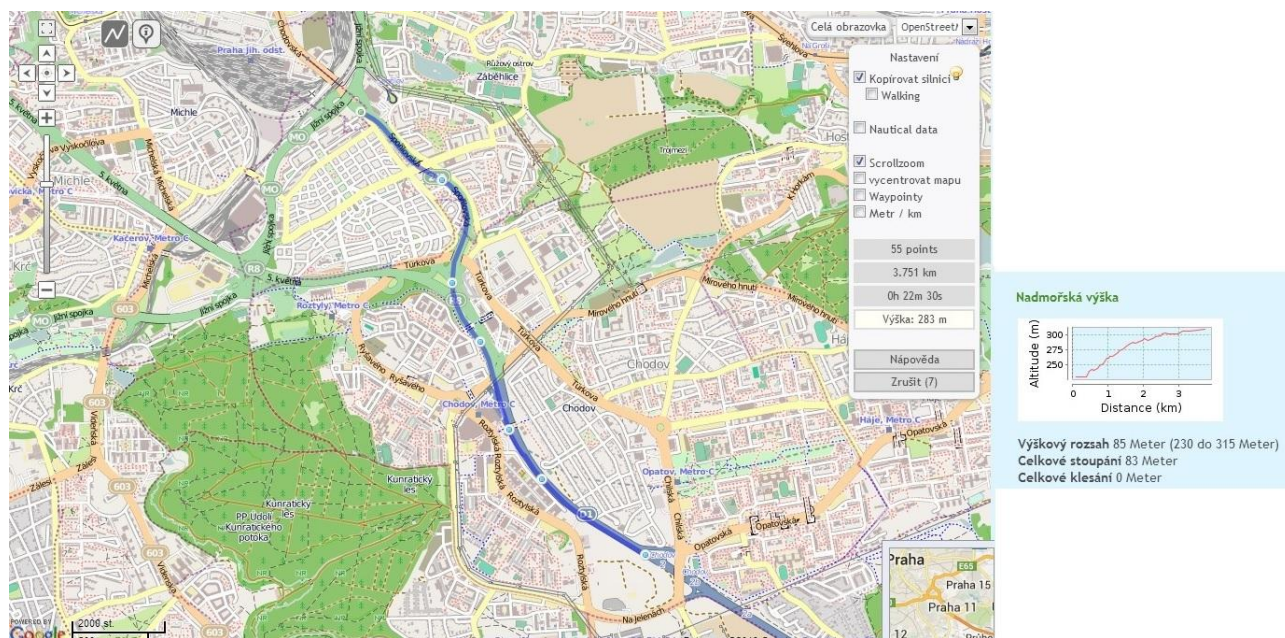
5.3.3 Měřicí trasy

Měření probíhalo na komunikacích hlavního města Prahy.

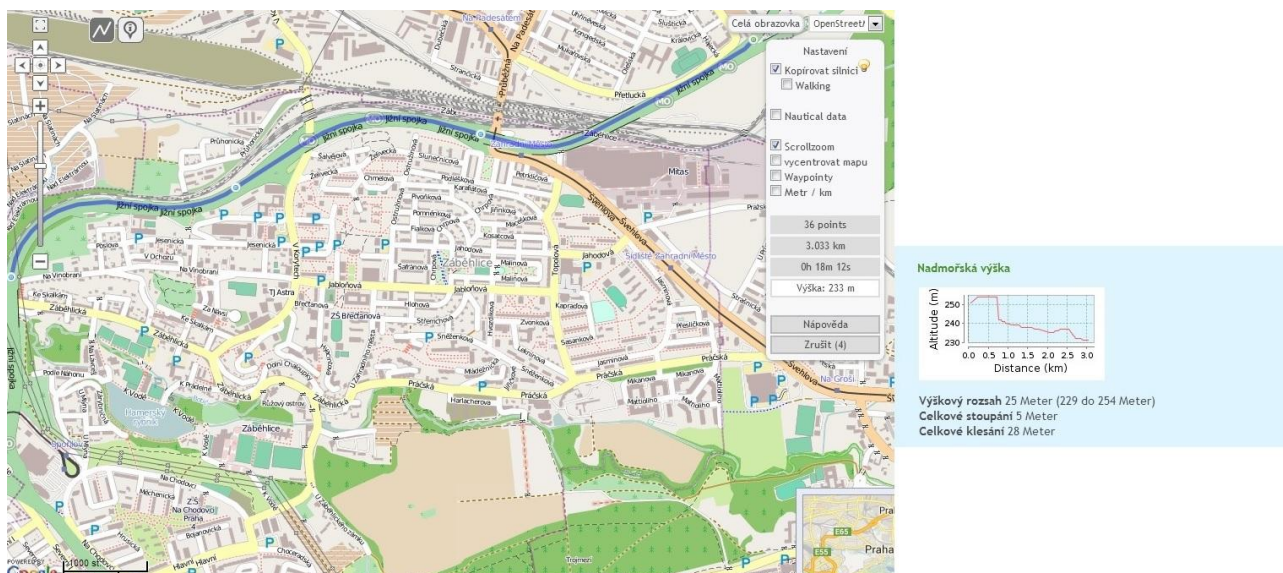
Měření probíhalo v městském prostředí zejména na vytížených tazích, kde je důležité sledovat a případně omezovat množství produkovaných škodlivin a vlivy ovlivňující jejich tvorbu, aby nedocházelo k nadměrnému znečištění ovzduší a případného ohrožení zdraví.

Při volbě trasy bylo snahou provádět měření nejen na rovné komunikaci, ale i na komunikaci se stoupáním, aby bylo možné zahrnout vliv profilu trati na produkci škodlivin a na tepelné zatížení.

Měření probíhalo v několika částech města Prahy, zejména na Spořilově, Černém Mostě, Hloubětíně, Kunraticích, Strašnicích a v Běchovicích. Ze všech naměřených hodnot byly vybrány k porovnání dva úseky, Spořilovský kopec viz. obr. 5.3.3.1 s výškovým převýšením 85 metrů a část Jižní spojky viz. obr. 5.3.3.2 s výškovým převýšením 25 metrů, kde byly naměřeny hodnoty, jak při velké hustotě provozu, tak při provozu plynulém.



Obr. 5.3.3.1: Měřená trasa - Spořilovský kopec



Obr. 5.3.3.2: Měřená trasa - část Jižní spojky

Měření probíhalo na přelomu měsíce dubna a května převážně na suché asfaltové silnici za slunečného počasí. Průměrná teplota ovzduší dosahovala přibližně 20 °C. Měření probíhalo v nadmořské výšce mezi 200 – 300 metrů nad mořem. V případě prvního měřeného úseku byl vliv změny výškového profilu téměř zanedbatelný, protože převýšení nebylo větší než 25 metrů na 3 kilometrovém měřeném úseku.

Všechny časové a rychlostní údaje byly poskytnuty ze zařízení GPS. Údaje o nadmořské výšce poskytnuté GPS zařízením byly vysoce nepřesné a tudíž nevhodné k dalšímu zpracování. K získání výškového profilu měřené trati bylo využito hodnot nadmořských výšek uvedených na internetové stránce www.gpsies.com viz. obr. 5.3.3.1 a obr. 5.3.3.2.

5.3.4 Styl jízdy

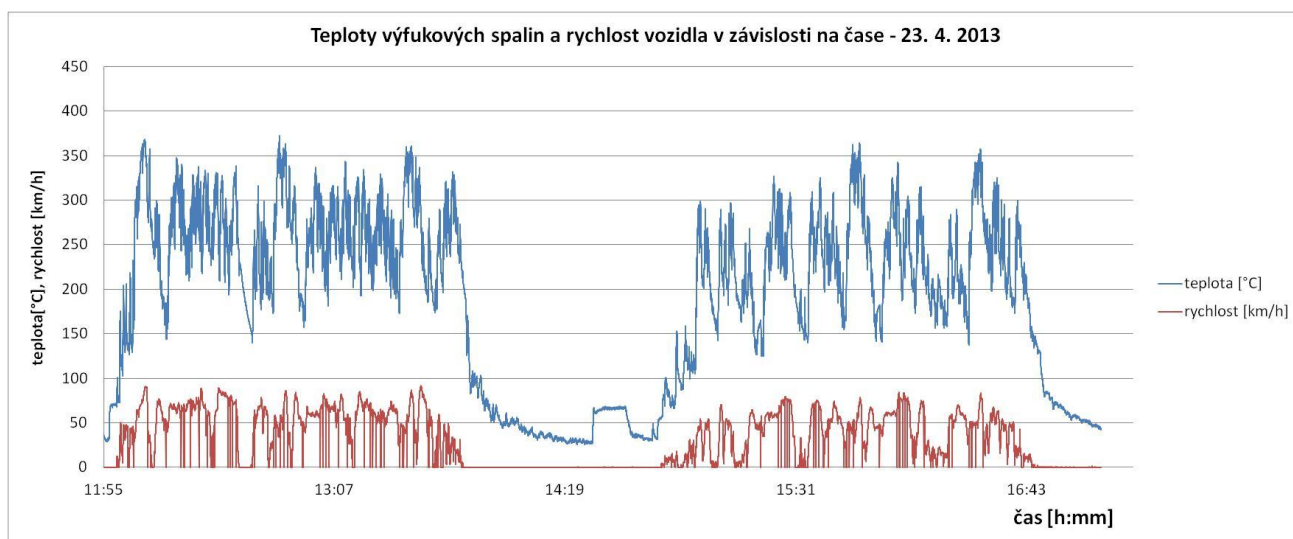
Velký provozní rozsah dnešních motorů má zásadní vliv na styl jízdy řidiče a tím pádem na průběh měření, z čehož vyplývá, že z jedné trasy lze získat naprosto odlišné hodnoty a výsledky. Proto bylo snahou, aby jízda při velké hustotě provozu byla co nejúspornější a byla srovnatelná se stylem jízdy většiny řidičů.

Při jízdě za nízkého provozu bylo snahou udržet motor v oblasti nejvyššího točivého momentu se zařazeným co nejvýše možným rychlostním stupněm a zároveň dodržení maximální povolené rychlosti.

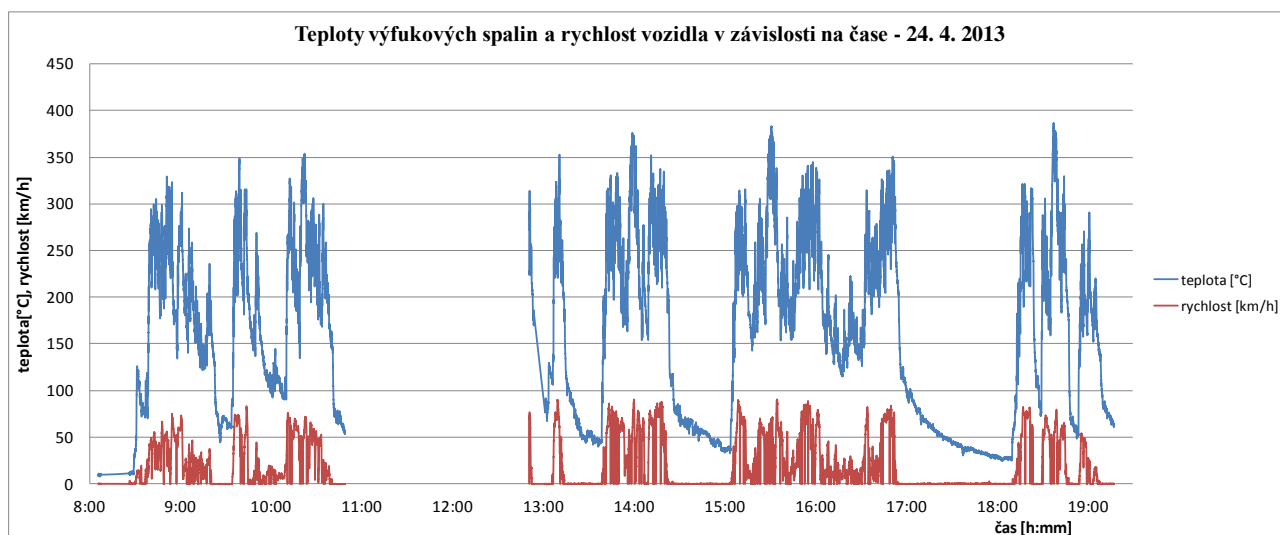
5.4 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

Z důvodu nadměrného množství dat není možné uvádět tabulky naměřených hodnot, proto jsou data prezentována pouze v grafické formě.

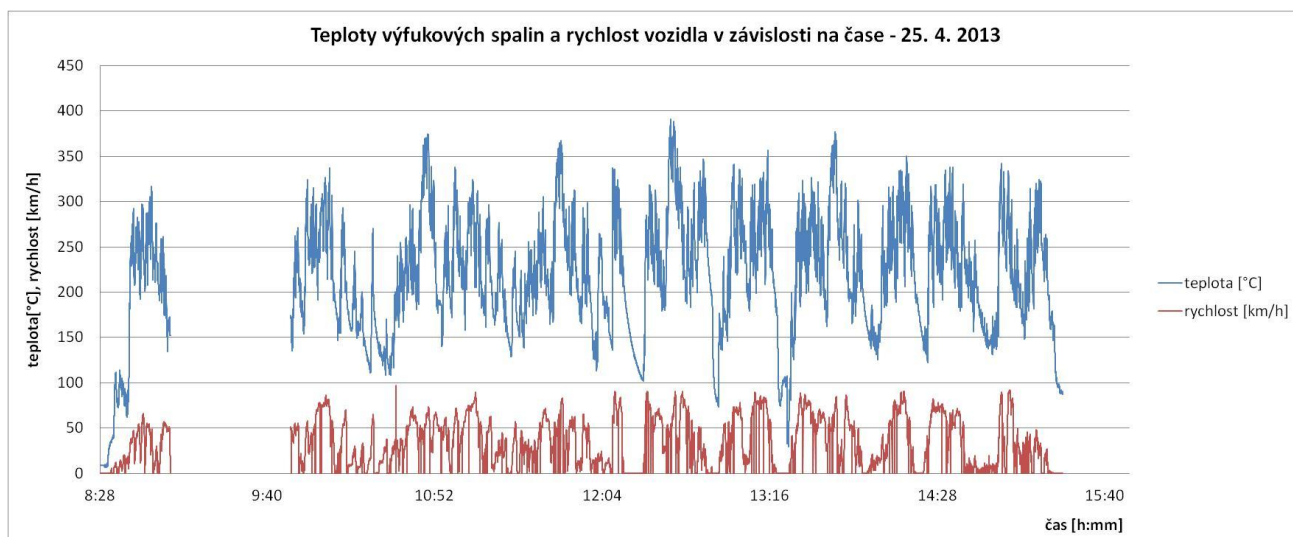
Grafy průběhů teplot výfukových plynů za celé měření:



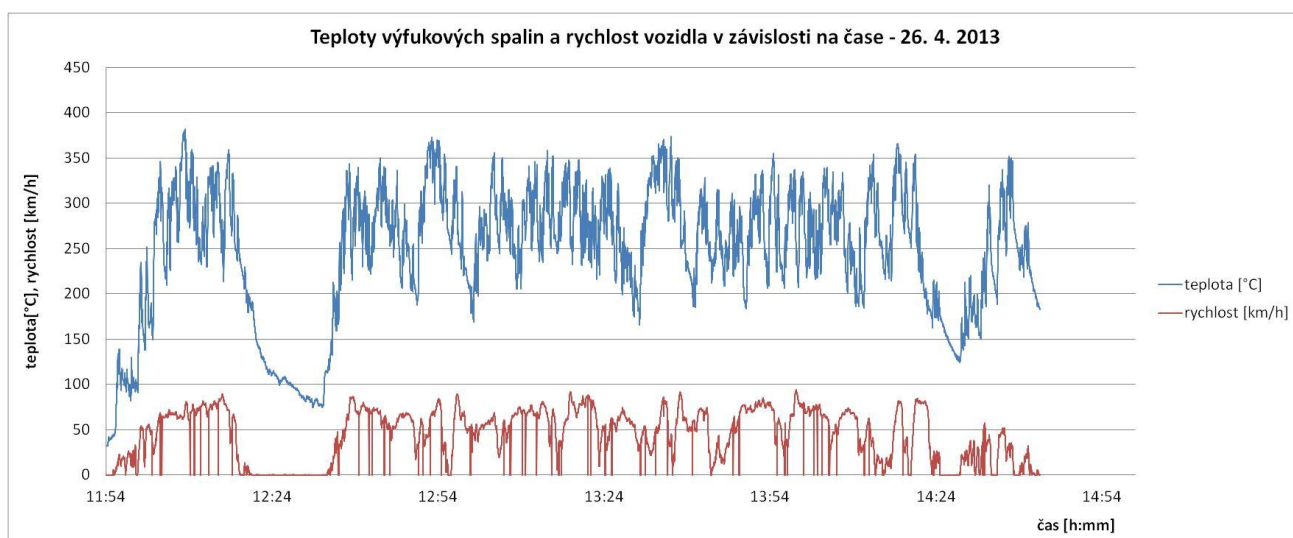
Graf. 5.4.1: Průběh teploty výfukových plynů a rychlosti ze dne 23. 4. 2013



Graf. 5.4.2: Průběh teploty výfukových plynů a rychlosti ze dne 24. 4. 2013



Graf. 5.4.3: Průběh teploty výfukových plynů a rychlosti ze dne 25. 4. 2013



Graf. 5.4.4: Průběh teploty výfukových plynů a rychlosti ze dne 26. 4. 2013

Údaje o okamžité rychlosti byly získány pomocí zařízení GPS.

Hodnoty teplot byly přepočteny z výstupních signálů termočlánu, umístěného v koncovce výfukového potrubí, pomocí vztahu (9):

$$t = \left(\frac{U}{R} - 0,004 \right) \cdot \left(\frac{t_{max} - t_{min}}{I_{max} - I_{min}} \right) - t_{min} \quad (9)$$

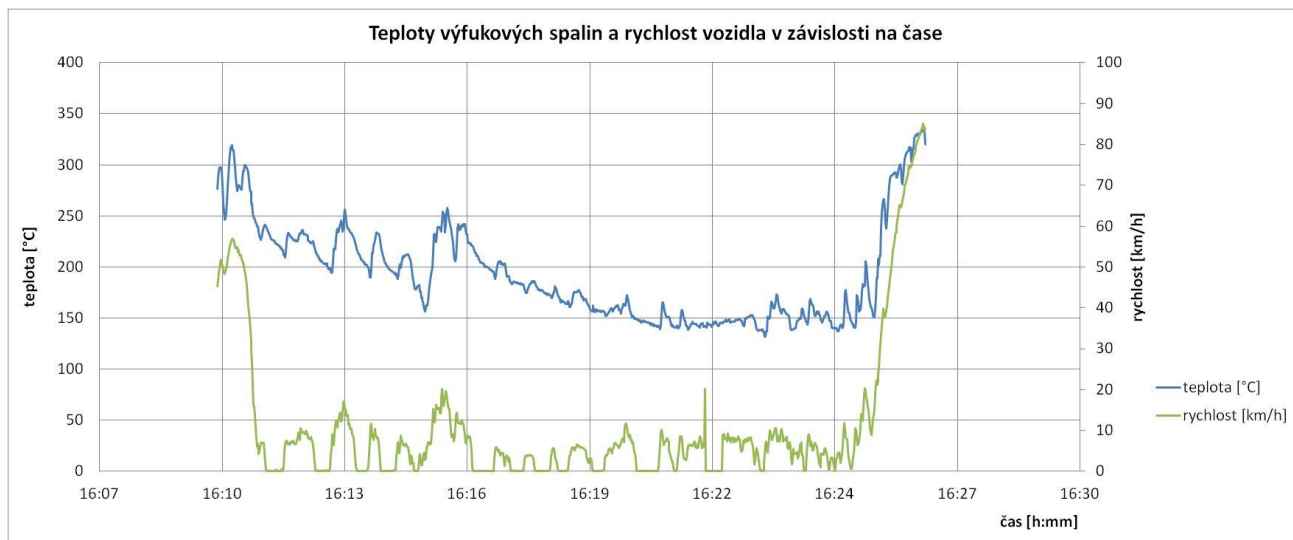
Kde U je napětí na termočlánu [V], odpor vzorkovacího zařízení $R = 248,8 \text{ } [\Omega]$, t_{\max} je maximální přípustná teplota $900 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$, t_{\min} je minimální přípustná teplota $-100 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$ termočlánu, hodnota $0,004 \text{ } [\text{A}]$ je dolní proudová hranice převodníku, veličiny I_{\min} a I_{\max} jsou horní a dolní hranice rozsahu převodníku ($4 \text{ } [\text{mA}] - 20 \text{ } [\text{mA}]$).

Tyto celodenní grafy průběhů teploty a rychlosti vozidla jsou pouze ilustrativní a slouží jen pro přehlednost. Ale z grafů je patrný vliv okamžité rychlosti vozidla na teploty. Celkem bylo za provozu navzorkováno 23 hodin se vzorkovací frekvencí 1 sekunda.

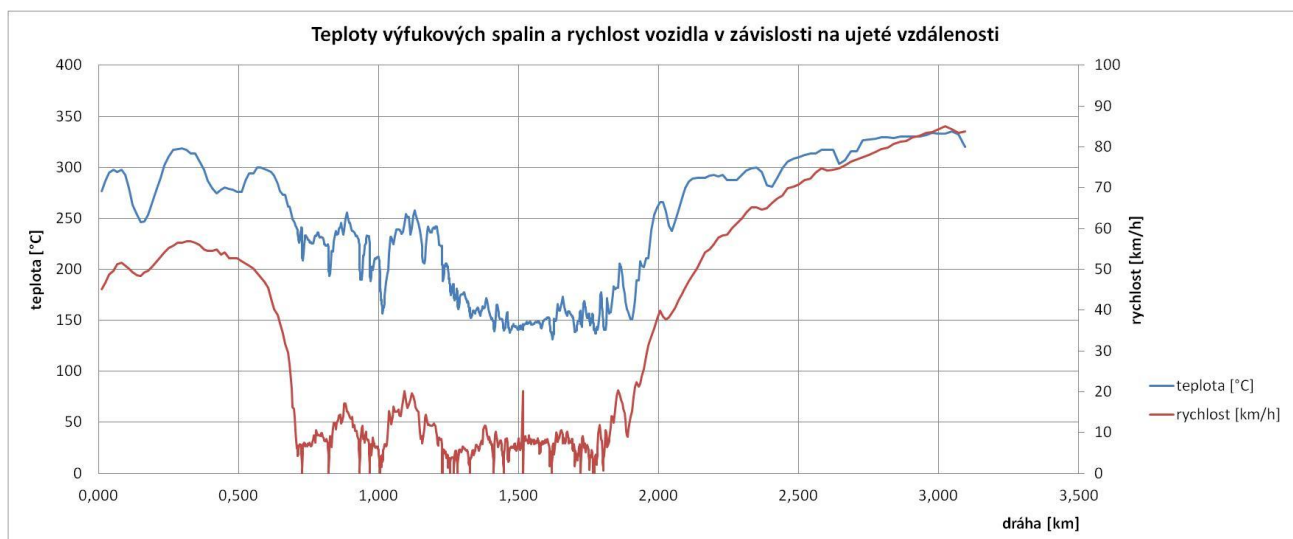
Z těchto 4 měřících dnů byly vybrány 2 úseky k porovnání:

Úsek Spořilovský kopec

Měření za vysoké hustoty provozu ze dne 25. 4. 2013:

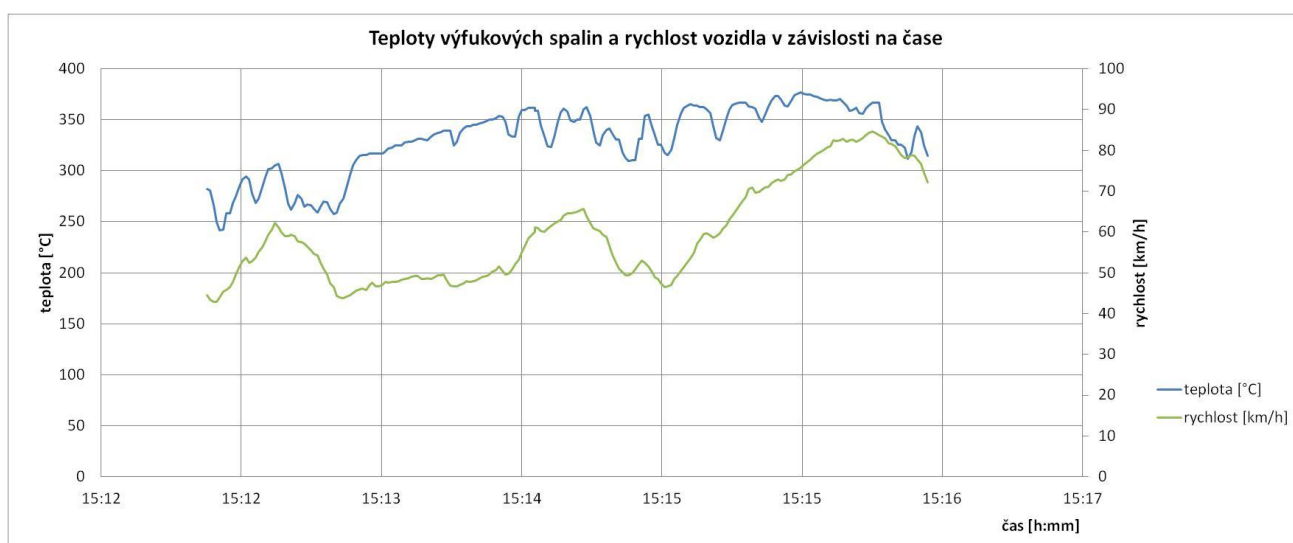


Graf. 5.4.5: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na čase

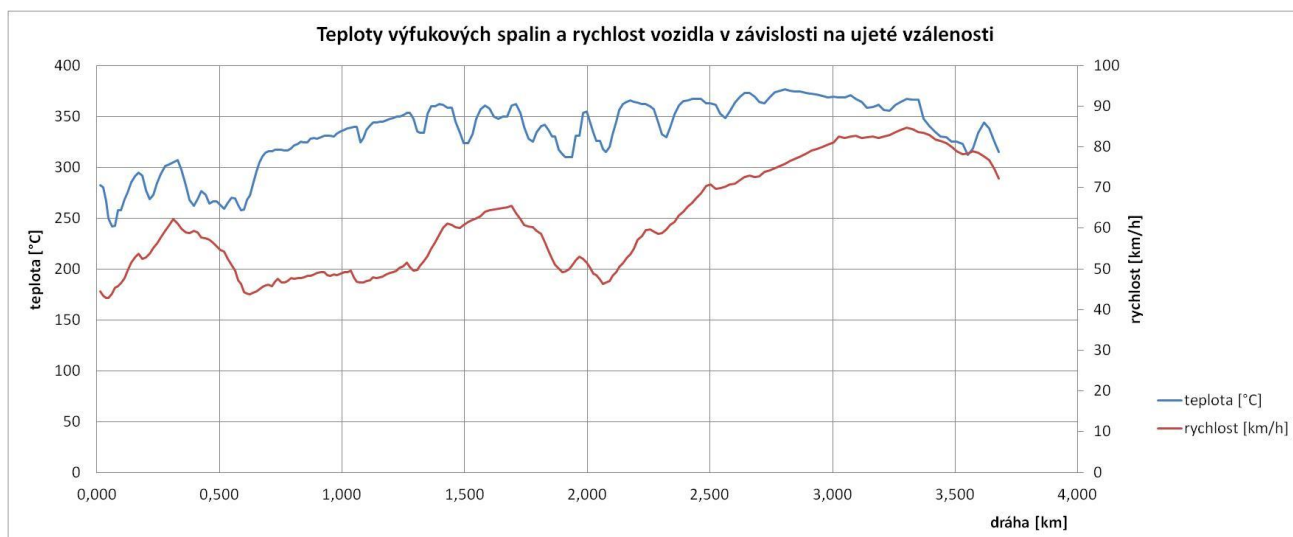


Graf. 5.4.6: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na ujeté vzdálenosti

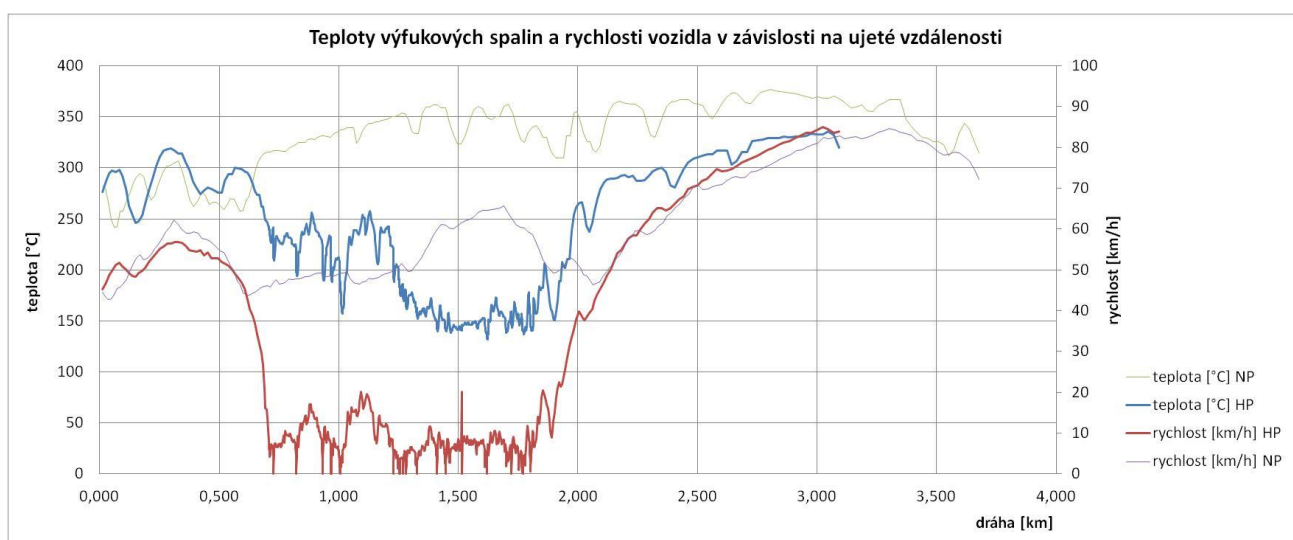
Měření za nízké hustoty provozu ze dne 25. 4. 2013:



Graf. 5.4.7: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na čase



Graf. 5.4.8: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na ujeté vzdálenosti



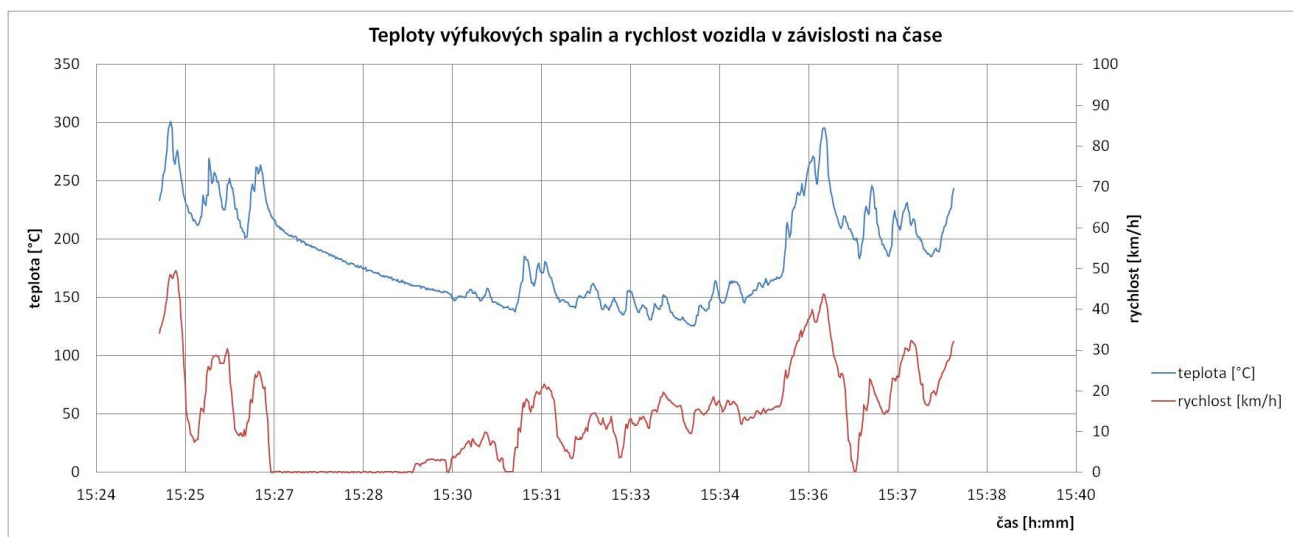
Graf. 5.4.9: Porovnání teplot a rychlostí Spořilovského kopce

Z grafu je jasně viditelné, že při pomalé jízdě do Spořilovského kopce (počáteční vzdálenost cca 1 km), kde převýšení dosahovalo cca 80 metrů, dosahovaly teploty výfukových plynů vyšších hodnot, než při stejné rychlosti na úseku bez převýšení.

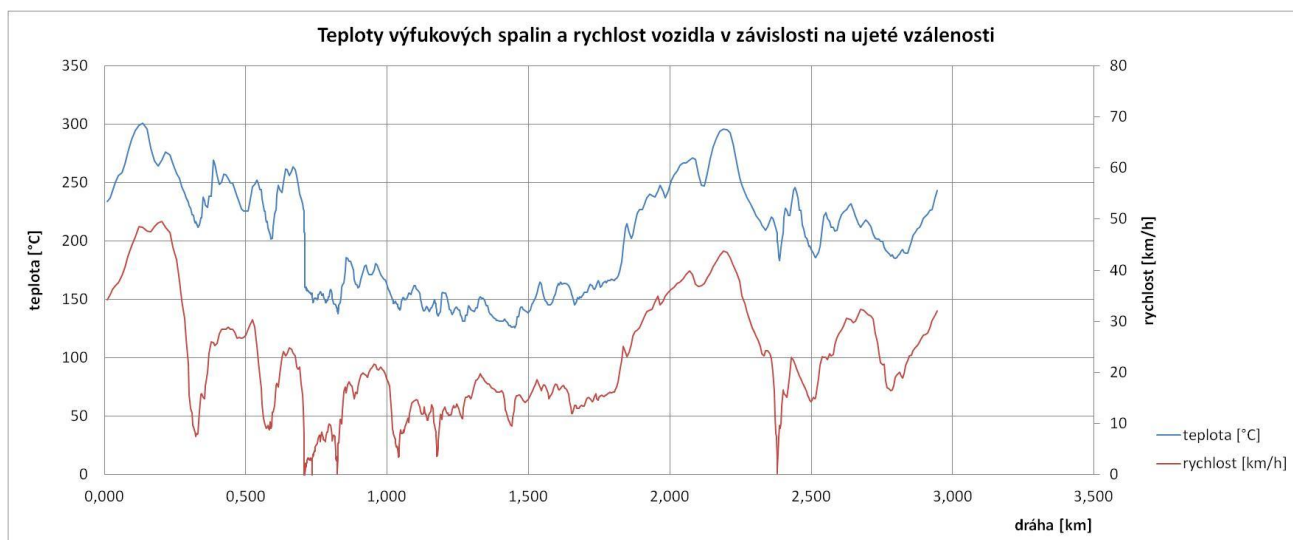
Dále je zřetelný výrazný rozdíl teplot při pomalé jízdě do kopce a po rovině, než při plynulé jízdě stejného úseku vyšší rychlostí. Důvodem, je téměř konstantní zatížení motoru v oblasti nejvyššího točivého momentu při plynulé jízdě.

Úsek části Jižní spojky

Měření za vysoké hustoty provozu ze dne 25. 4. 2013:

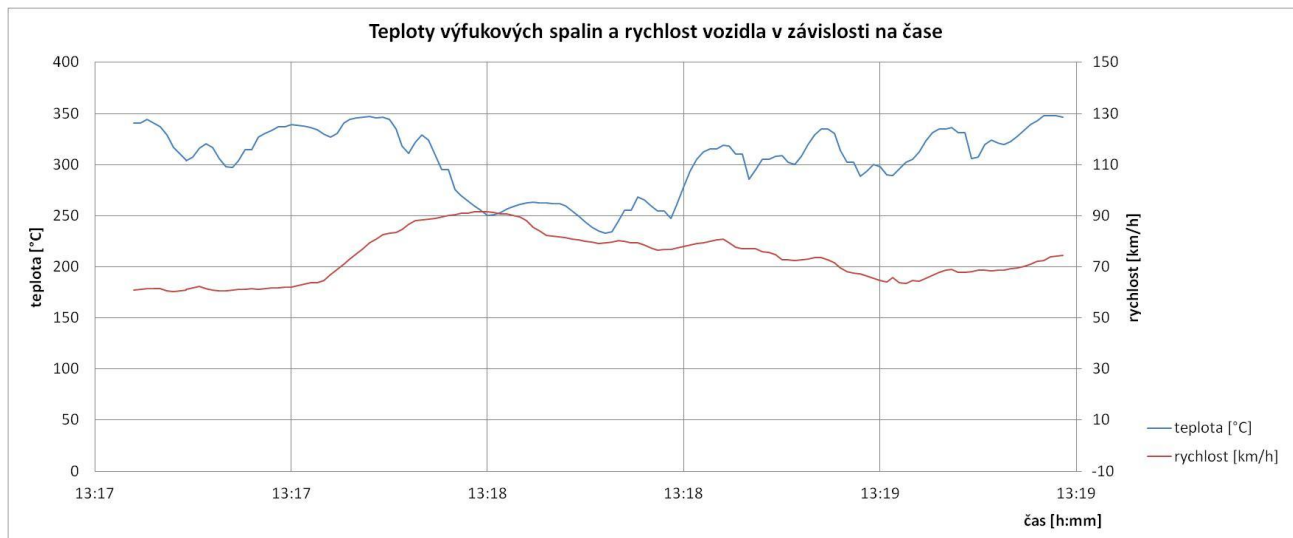


Graf. 5.4.10: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na čase

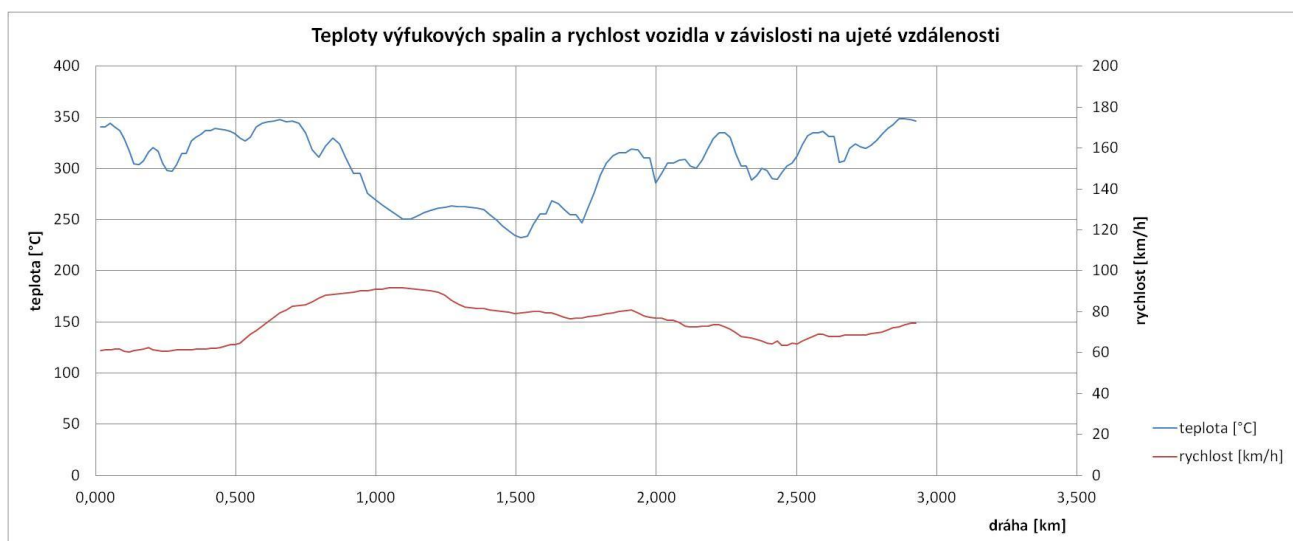


Graf. 5.4.11: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na ujeté vzdálenosti

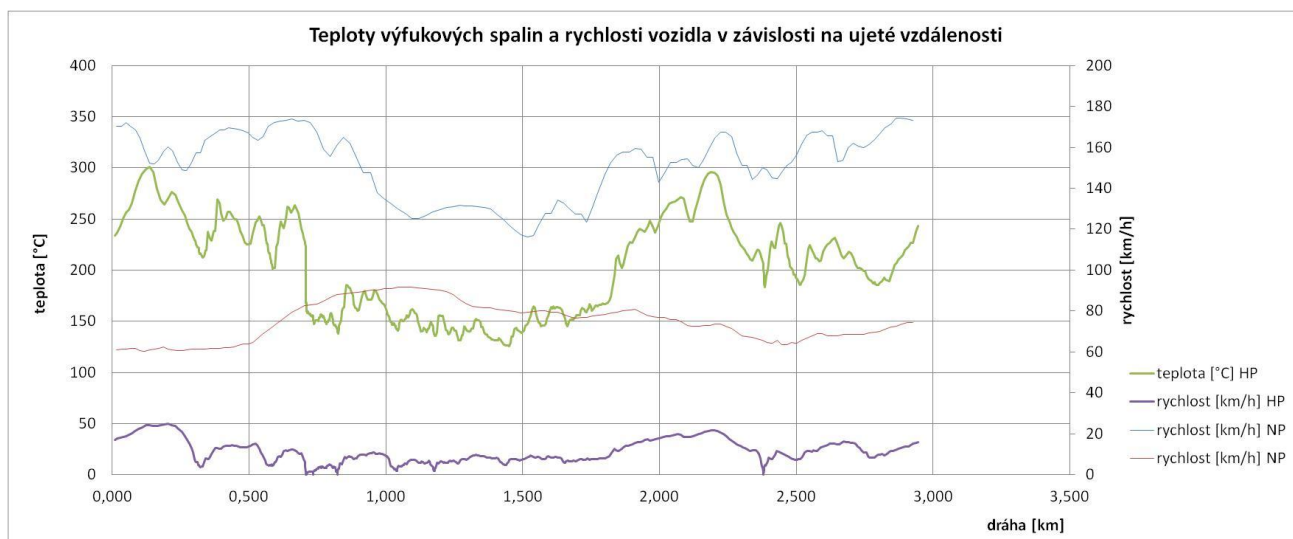
Měření za nízké hustoty provozu ze dne 26. 4. 2013:



Graf. 5.4.12: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na čase



Graf. 5.4.13: Závislost teploty výfukových plynů a okamžité rychlosti vozidla na ujeté vzdálenosti



Graf. 5.4.14: Porovnání teplot a rychlostí části Jižní spojky

Ze závislosti teplot na ujeté vzdálenosti jsou patrné vyšší hodnoty teplot krátce po vychladnutí motoru při stejné průměrné rychlosti. Měření na Jižní spojkě můžeme považovat za téměř konstantní výškový profil, proto zde chybí vyšší nárůst teplot, při jízdě do kopce, jako tomu bylo u měření na Spořilově. Závislost teploty na okamžité rychlosti je téměř identická, jako v předchozím případě.

5.5 Zhodnocení měření

Měřením byla ověřena závislost teplot výfukových plynů na provozních podmínkách motoru a tím pádem na okamžité rychlosti vozidla. Dále vliv teploty motoru, při jízdě po studeném startu dosahují teploty výfukových plynů vyšších hodnot v porovnání s motorem zahřátým. Vyšší tepelné hodnoty mají zásadní vliv na tvorbu oxidů dusíku (NO_x).

Při porovnání výkyvů teplot z hlediska okamžité rychlosti, byly výkyvy při změně okamžité rychlosti větší při malých rychlostech, než výkyvy teplot při změně rychlosti při jízdě vyšší rychlostí.

Při detailnějším porovnání výsledků je velmi jasně viditelný teplotní rozdíl (samozřejmě, že teploty naměřené na konci výfukového potrubí se nerovnají teplotám plynů před vstupem do katalytických zařízení, ale jejich rozdíl není významný) při jízdě vozidla za různé hustoty provozu.

Za hustého provozu se hodnoty teplot pohybovaly okolo 150 °C. Katalytické

systémy na redukci oxidů dusíku (NO_x) (vznětové motory emitují nejvíce právě NO_x) a filtry částic, byly vyvinuty hlavně z důvodu redukce oxidů dusíku a pevných částic ve městech a na dopravně vytížených komunikacích. Pro správnou funkci těchto systémů je ale nutné dosáhnout teploty výfukových plynů nejméně 200 °C, tudíž z výsledků měření a teoretických poznatků vyplývá, že nemohou být za těchto podmínek plně funkční.

I když měřený nákladní automobil nebyl vybaven žádným zařízením na redukci škodlivin, lze na základě teoretických poznatků soudit relativně stejný průběh pro vozidla těmito zařízeními vybavenými.

Lze také předpokládat, že podobný průběh teplot můžeme očekávat i u ostatních druhů nákladních vozidel v závislosti na objemu motoru, výkonu, stylu jízdy atd.

Výsledky jsou velmi ovlivňovány stylem jízdy řidiče, proto není možné se jimi jednoznačně řídit.

6 Diskuze výsledků

Jedním z důvodů zavedení systémů SCR a filtru částic bylo snížení emisí zejména v městském prostředí a na dopravně vytížených tazích. Ovšem tyto systémy, jak již bylo řečeno, potřebují ke svému provozu teplotu výfukových plynů cca 200 °C, které, jak měření ukázalo, v městském hustém provozu nebylo dosaženo, tudíž tyto zařízení, podle teoretických poznatků nemohla být plně funkční.

Otázkou je, zda toto řešení bylo správné a tudíž jestli řešení tohoto problému nehledat jiným směrem. Např. použít přes městská území transport kamionové dopravy pomocí vlakové dopravy, a tím ulevit městskému provozu i tvorbě kolon.

Další sporné řešení, platné například již v Praze, zákaz vjezdu do určitých lokalit, pokud vozidlo nesplňuje danou emisní normou Euro. Vozidlo splňuje emisní normu Euro v určitém cyklu, ale tento cyklus nezohledňuje reálné podmínky městského charakteru, tudíž vozidlo splňující danou normu produkuje mnohem vyšší emise, než stanovuje norma.

Možným řešením by byla jiná koordinace dopravy.

7 Závěr bakalářské práce

Na počátku této bakalářské práce, bylo nutné získat potřebné teoretické znalosti, které následně mohly být uvedeny do praxe.

V této práci byl vypracován přehled podmínek provozu spalovacích motorů, přehled škodlivin výfukových plynů a vliv spalovacích motorů na životní prostředí, způsob měření spalin, uvedení do problematiky jejich legislativního omezení a přehled konstrukčních prvků na vozidle na jejich redukování.

Hlavním cílem bylo navržení a sestrojení ředicího tunelu, s jehož pomocí mělo být provedeno vzorkování a měření teplot výfukových plynů v reálném provozu a zjištění vlivu teplot na provozní podmínky motoru a porovnání hodnot v reálném provozu.

I přes počáteční obtíže, které vznikly při konstrukci ředicího tunelu se podařilo sestrojít funkční ředicí tunel, který se úspěšně ověřil v praxi a pomocí kterého bylo následně navzorkováno ve 4-denním režimu celkem 23 provozních hodin.

Výsledkem provedeného měření byl průběh teplot v závislosti na rychlosti nákladního vozidla a ujeté vzdálenosti a byla ověřena závislost teploty výfukových plynů na okamžité rychlosti vozidla a okolních vlivů. Při detailnějším rozboru byl zjištěn výrazný rozdíl teplot při jízdě za různé hustoty provozu.

Pro splnění emisních limitů nyní platné normy Euro V, byly pro vznětové motory vyvinuty zařízení jako jsou SCR a oxidační katalyzátory (jejichž cena značně ovlivňuje cenu vozidla), které měly přispět ke snížení emisí zejména ve městech a na zvláště vytížených tazích, kde dochází nejvíce k lokálnímu znečištění ovzduší.

Účinnost těchto katalytických zařízení je mimo jiné závislá na teplotě výfukových plynů a pod jistou hranicí cca 200 až 250 °C je jejich účinnost velmi nízká, ne-li zanedbatelná.

Výsledek této práce přinesl velmi zajímavé hodnoty a ukázal, že teplota výfukových spalin na vytížených tazích, kde je provoz velmi hustý a průměrná rychlost téměř nulová, nabývá hodnot okolo 150 °C, tudíž katalytická zařízení nejsou za těchto podmínek plně účinná. Na druhou stranu na mimo městských komunikacích tato zařízení fungují bez problémů, ale tam dochází k rozptýlení výfukových spalin do širšího prostředí.

Výroba ředicího tunelu a měření na nákladním voze Iveco Trakker proběhly za podpory Evropské unie programu LIFE+ (LIFE10-ENV-CZ-651) - MEDETOX (www.medetox.cz).

Zdroje a použitá literatura

Knižní publikace

- [1] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1997, 111 s. ISBN 80-010-1632-3.
- [2] BOSCH, Robert. *Diesel-engine management*. 3rd ed. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2004, 489 s. ISBN 18-605-8435-7.
- [3] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*, 1. vyd. Brno: NAKLADATELSTVÍ VYDAVATESTVÍ VLK, Brno, 2000. 434 str. ISBN 80-238-5273-6
- [4] *Technická dokumentace k zařízení pro vzorkování částic a k experimentálnímu vozidlu*. Liberec, 2012.
- [5] MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.
- [6] BAUMRUK, Pavel. *Příslušenství spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1996, 236 s. ISBN 80-010-1103-8.
- [7] KOUBLE, Jan. Požadavky na diagnostické měření výfukových plynů v automobilové dopravě. Plzeň, 2011. 70 s. Bakalářská práce. ZČU v Plzni.
- [8] Emise vznětových motorů a zážehových motorů (poháněných zemním plynem a zkapalněným ropným plynem). In: *Předpis č. 49 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN)*. 2008.

Publikace na internetu

- [9] Oxid uhelnatý. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhelnat%C3%BD

- [10] Oxid uhličitý. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_uhli%C4%8Dit%C3%BD
- [11] Emise: čím jsou nebezpečné?. *Www.ZaVolantem.cz* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://www.zavolantem.cz/clanky/emise-cim-jsou-nebezpecne-prvni-cast>
- [12] Oxid dusný. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_dusn%C3%BD
- [13] Oxid siřičitý. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD
- [14] European emission standards. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards
- [15] Emisní norma EURO. *Autolexicon* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>
- [16] Emission Standards. *Dieselnet* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [17] Exhaust Gas Recirculation. *Doosanequipment* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: http://www.doosanequipment.eu/doosanequipment/products/stageIIb/stageIIb-StageIV_technologies/EGR-exhaust_gas_recirculation.page
- [18] Exhaust Gas Recirculation. *Sttemtec* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://www.sttemtec.com/en/egr/egr.php>
- [19] How SCR Works. *Thomasbus* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://www.thomasbus.com/earth-friendly/scr/how-it-works.asp>
- [20] Mazda launches 2009 CX-7 in Europe with urea selective catalytic reduction system. *Green.autoblog* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://green.autoblog.com/2009/03/17/mazda-launches-2009-cx-7-in-europe-with-urea-selective-catalytic/>
- [21] IAA 2003: AUDI A8 3.0 TDI: FIRST LUXURY SEDAN TO EU4 & WITH DIESEL PARTICULATE FILTER. *Vwvortex* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z:

<http://www.vwvortex.com/news/audi-news/iaa-2003-audi-a8-3-0-tdi-first-luxury-sedan-to-eu4-amp-with-diesel-particulate-filter/>

- [22] Lambda sonda. *Automarg* [online]. 2013 [cit. 2013-07-13]. Dostupné z: <http://www.automarg.cz/dily/lambda-sonda-xs-047906262/41349395/>
- [23] Katalyzátor. *Autolexicon* [online]. 2013 [cit. 2013-07-14]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/katalyzator/>
- [24] Diesel retrofit subsite. *Meca* [online]. 2013 [cit. 2013-07-14]. Dostupné z: http://www.meca.org/cs/root/diesel_retrofit_subsite/what_is_retrofit/what_is_retrofit
- [25] 2-2 charakteristiky: motory a pohony. Brno, 2012. Dostupné z: http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/html/motory_a_pohony/pohony_a_motory/prednasky/oficialni_sylaby/2-2-charakteristiky.pdf

Články v časopisech

- [26] VOJTÍŠEK, Michal. Současné trendy ve výfukových emisích z pístových spalovacích motorů, vliv provozních podmínek a dalších faktorů na emise, metody měření. *Ochrana ovzduší*. 2011, č. 2.

Poznámka:

Označení přiložených výkresů:

KVM - BP - S12000729-00
KVM - BP - S12000729-K
KVM - BP - S12000729-01
KVM - BP - S12000729-02
KVM - BP - S12000729-03
KVM - BP - S12000729-04
KVM - BP - S12000729-05